

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Elèctrica

**MITIGACIÓ D'EMISSIONS I CANVIS DE POLÍTIQUES
ENERGÈTIQUES. ANÀLISI DE VIABILITAT DE LA SUBSTITUCIÓ
D'UNA CENTRAL TÈRMICA DE CARBÓ AMB ENERGIA EÒLICA**



Memòria i Annexos

Autor: Lluç Camps Calvo
Director: Josep Xercavins Valls
Convocatòria: Juny 2018

Resum

Aquest treball té com a finalitat comprovar la viabilitat en la substitució d'energia obtinguda purament de fonts fòssils no renovables com és el carbó, per una altra de renovable com és l'energia eòlica, i així poder confirmar la següent afirmació: *“Tecnològicament parlant, la transició total dels mix energètics que funcionen amb combustibles fòssils per energies renovables serà possible en un parell de dècades”*

En primer lloc, es fa una explicació tant del marc teòric en que s'enquadren els requisits tècnics necessaris per la generació d'energia en les seves diverses variants. És també motiu d'estudi l'evolució en la implantació d'aerogeneradors arreu d'Espanya ens els darrers 20 anys, a més d'una descripció de les característiques concretes de funcionament d'aquests. Es complementa amb una revisió de les particularitats del context polític espanyol en allò que fa referència a la implantació de les energies renovables.

La part central del treball gira entorn a l'explicació de les diferències en el procés d'obtenció de l'energia produïda per una central convencional de carbó i una d'eòlica que la vol substituir. Es determina en concret el nombre necessari d'aerogeneradors a instal·lar per obtenir una energia elèctrica equiparable a la d'una central tèrmica de carbó a ser tancada i substituïda.

Finalment, s'ha abordat una tasca analítica-comparativa de ambdues tecnologies mitjançant indicadors ambientals on s'inclou també una valoració d'impacte ambiental, social i econòmic.

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad comprobar la viabilidad en la sustitución de energía obtenida puramente de fuentes fósiles no renovables como es el carbón, por otra de renovable como es la energía eólica, y así poder confirmar la siguiente afirmación: "Tecnológicamente hablando, la transición total de los mix energéticos que funcionan con combustibles fósiles por energías renovables será posible en un par de décadas"

En primer lugar, se hace una explicación tanto del marco teórico en que se encuadran los requisitos técnicos necesarios para la generación de energía en sus diversas variantes. Es también motivo de estudio la evolución en la implantación de aerogeneradores en toda España en los últimos 20 años, además de una descripción de las características concretas de funcionamiento de estos. Se complementa con una revisión de las particularidades del contexto político español en lo que se refiere a la implantación de las energías renovables.

La parte central del trabajo gira en torno a la explicación de las diferencias en el proceso de obtención de la energía producida por una central convencional de carbón y una de eólica que la quiere sustituir. Se determina en concreto el número necesario de aerogeneradores a instalar para obtener una energía eléctrica comparable a la de una central térmica de carbón a ser cerrada y sustituida.

Finalmente, se ha abordado una tarea analítica-comparativa de ambas tecnologías mediante indicadores ambientales donde se incluye también una valoración de impacto ambiental, social y económico.

Abstract

This work has the purpose of verifying the viability in the replacement of energy obtained purely from non-renewable fossil sources such as coal, on the other as renewable energy, and thus to confirm the following statement: "Technologically speaking , the total transition of energy mixes that work with fossil fuels for renewable energies will be possible in a couple of decades "

In the first place, an explanation is made both of the theoretical framework in which the technical requirements necessary for the generation of energy in their various variants are set. The evolution in the implantation of wind turbines throughout Spain over the last 20 years is also the subject of study, as well as a description of the specific characteristics of their operation. It is complemented by a review of the particularities of the Spanish political context in what refers to the introduction of renewable energies.

The central part of the work revolves around the explanation of the differences in the process of obtaining the energy produced by a conventional coal and wind power plant that wants to replace it. Specifically, the number of wind turbines required to be installed is determined in order to obtain an electric energy comparable to that of a coal-fired power plant to be closed and replaced.

Finally, an analytical-comparative task of both technologies has been addressed through environmental indicators, which also includes an assessment of the environmental, social and economic impact.

Agraïments

Dedicat a tota la meva família, per tot l'esforç que heu fet perquè jo avui estigui aquí. També una especial dedicació als meus avis Àngel i Àgueda que m'hauria agradat molt que m'haguéssiu vist aconseguir aquest objectiu. Gràcies per ensenyar-me tant.

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
1. PREFACI	1
Origen del treball.....	1
Motivació.....	1
2. INTRODUCCIÓ	3
Objectius del treball	3
Metodologia	4
3. ESTAT ACTUAL DE LES ENERGIES A ESPANYA	5
3.1. Context global	5
3.2 Situació energètica d'Espanya	7
3.2.1. Situació energètica a Castella i Lleó	9
3.3 Fonts per la producció d'energia elèctrica d'una central convencional de carbó i una d'alternativa eòlica	10
3.3.1 El carbó	10
3.3.1.1 El sector de la mineria del carbó a Espanya	10
3.3.1.2 Mètodes d'extracció de carbó	12
3.3.2 El recurs eòlic.....	13
4. ESTUDI DE LA CENTRAL A SUBSTITUIR	15
4.1. Funcionament d'una central tèrmica de carbó	15
4.2 Obtenció de resultats de producció energètica	16
4.2.1 Desenvolupament	17
5. ESTUDI DE LA CENTRAL SUBSTITUTÒRIA	19
5.1 L'aerogenerador i el parc eòlic.....	19
5.1.1 Funcionament d'un aerogenerador	19
5.1.2 Components de l'aerogenerador escollit.....	26

5.1.3 Distribució de parcs eòlics	35
5.1.3.1 Optimització de la producció d'energia	36
5.1.3.2 Impacte visual	37
5.1.3.3 Soroll	38
5.1.3.4 Càrrega de la turbina	39
5.2 Determinació de la superfície del parc eòlic	41
6. COMPARATIVA AMB INDICADORS DE SOSTENIBILITAT	43
6.1 Desenvolupament sostenible	43
6.2 Metodologia	43
6.3 Definició d'Indicadors ambientals	44
6.3.1 Emissions a l'aire	44
6.3.2 Contaminants a l'aigua	47
6.3.3 Residus	47
6.3.4 Usos del sol	47
6.4 Definició d'Indicadors econòmics	49
6.5 Definició d'Indicadors socials	51
6.5.1 Seguretat del subministra	51
6.5.2 Problemes Intergeneracionals	51
6.5.3 Llocs de treball	52
6.5.4 Acceptació social	52
ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	54
CONCLUSIONS	55
ANÀLISI ECONÒMICA	57
BIBLIOGRAFIA	59
ANNEX 1	61
A1. Càlcul del número d'aerogeneradors	61
A2. Càlcul dels indicadors ambientals	63

1. Prefaci

En els últims anys hi ha hagut un gran augment de l'interès en el desenvolupament d'energies renovables, a causa de la creixent preocupació pel canvi climàtic. Entre les principals energies renovables es troba l'eòlica, capaç de produir a partir del vent una considerable quantitat d'energia. Perquè aquests nous mètodes de generació puguin ser competitius amb els ja establerts, caldrà que puguin complir amb la demanda necessària a més d'assegurar un proveïment d'energia de qualitat.

Origen del treball

L'origen del treball sorgeix en el moment en què s'observa que la tecnologia de les turbines eòliques millora i permet la construcció d'aerogeneradors amb noves característiques que augmenten de forma important la quantitat d'energia generada. Això permet pensar i preguntar-se si per intentar frenar l'augment de la temperatura mitjana terrestre deguda a la modificació humana de l'efecte hivernacle, sigui possible substituir una central tèrmica convencional, en aquest cas, de carbó a partir de fonts renovables com energia eòlica.

Motivació

La motivació doncs d'aquest treball és donar respostes a la pregunta de si és viable la substitució d'una central tèrmica de carbó per una d'energia eòlica. També comprovar l'impacte que pot tenir tant mediambiental, social i econòmicament aquesta substitució.

2. Introducció

Al llarg d'aquest treball es pretén estudiar l'efecte que pot tenir la constant evolució en la tecnologia dels aerogeneradors i en el seu comportament per tal de minimitzar l'impacte ambiental en la producció d'energia. En primer lloc, s'explicarà la gran importància de desenvolupar tècniques i mètodes d'energies renovables i no contaminants que puguin ser competitives amb les energies fòssils convencionals. El treball es focalitzarà en determinar la potència eòlica a instal·lar i per tant la superfície necessària d'un parc eòlic per produir la mateixa quantitat d'energia que la central convencional que es pretendrà tancar.

Posteriorment s'estudiarà una part més tècnica, que mitjançant mètodes de càlcul es determinarà el nombre necessari d'aerogeneradors a instal·lar per obtenir una energia elèctrica equiparable a la d'una central tèrmica de carbó. A continuació, s'explicarà el funcionament dels generadors eòlics més comuns i els nous mecanismes que s'han desenvolupat per millorar el funcionament d'aquests.

Finalment, es compararan les dues tecnologies estudiades mitjançant indicadors ambientals per dur a terme les conclusions necessàries del projecte.

Objectius del treball

L'objectiu d'aquest treball es realitzar una anàlisi de viabilitat i sostenibilitat de la generació d'energia elèctrica utilitzant com a subjecte de la generació una central tèrmica convencional de carbó que es vol tancar i substituir per una amb energia eòlica, de forma que la renovable i neta, produeixi la mateixa energia bruta (GWh) que la central d'estudi a tancar.

Es tracta de determinar mitjançant tècniques d'evacuació multi criteri quina de les dues tecnologies de generació és més sostenible, considerant aspectes tècnics, econòmics, mediambientals i socials.

Metodologia

Aquest treball preveu assolir els objectius establerts segons la següent metodologia:

- Adquirir i descriure els coneixements necessaris de l'estat energètic espanyol actual
- L'acord de París sobre el Canvi climàtic
- Exposar, en els contextos anteriors, les característiques de les fonts renovables i netes i no renovables i brutes.
- Conèixer el funcionament d'una central tèrmica de carbó escollida com a cas d'estudi
- Producció a nivell anual que té la central d'estudi
- Mètodes de càlcul per arribar a obtenir la potència eòlica a instal·lar per substituir i tancar la central de carbó d'estudi
- Coneixements científics i tecnològics dels components d'un aerogenerador
- Optimització dels aerogeneradors en la producció d'energia eòlica
- Determinació de la superfície d'instal·lació del futur parc eòlic que substituiria la central de carbó

3. Estat actual de les energies a Espanya

3.1. Context global

Al 2013, el 81,2% del consum total de l'energia del món procedia de combustibles fòssils, la xifra més alta des de 1981.

El carbó, l'energia nuclear y el gas natural son les principals fonts en les que depenem per cobrir les nostres necessitats energètiques.

El gran problema d'aquests combustibles fòssils, és que són un recurs limitat i per tant que pot esgotar-se si continuem amb un consum tan elevat. Els combustibles fòssils es varen formar fa milions d'anys a partir de les restes orgàniques d'animals i plantes. Aquestes restes varen quedar sota terra, coberts per sediments, que en determinades condicions ,van formar els diversos recursos energètics tal i com els coneixem avui en dia.

Els combustibles fòssils més antics s'originaren fa 500 milions d'anys (Antracita), mentre que els més recents es van començar a formar fa 5 milions d'anys (turba o lignit). La velocitat de regeneració d'aquests materials fa que siguin un recurs no renovable, a més de insuficient per cobrir la demanda energètica de les futures generacions.

Un altre inconvenient crític dels combustibles fòssils , és el problema mediambiental que genera el seu ús. Durant la seva combustió, s'alliberen gasos com el diòxid de carboni , sent aquest el qui més contribueix a augmentar l'efecte hivernacle i per tant l'increment tant accelerat de la temperatura mitjana del planeta.

En aquest sentit l'acord de París, liderat per la EUA i Xina, és un tractat ambiciós en tant que té com a objectiu fonamental evitar que l'increment de la temperatura mitjana global superi els 2 °C respecte als nivells preindustrials. D'altra banda, s'aborda la necessitat de adaptar-se als efectes adversos del canvi climàtic, així com reconèixer les necessitats dels països amb menys recursos per afrontar polítiques climàtiques adequades. En quant al finançament, s'adopten les bases per a una transició cap a models baixos en emissions i resistents al canvi climàtic. Per primera vegada es valoren els esforços voluntaris dels països en desenvolupament i s'acorda fer un seguiment de les accions climàtiques a través d'un sistema transparent i amb un balanç global cada cinc anys.

En relació a l'aspecte de mitigació, s'estableix l'objectiu que l'increment de la temperatura mitjana global no superi els 2 °C, així com valorar els esforços addicionals perquè l'escalfament no superi els 1.5 °C. Es reconeix la necessitat que les emissions globals toquin sostre el més aviat possible, encara que porti més temps als països en desenvolupament. El mecanisme per a seguiment de la reducció d'emissions, accions d'adaptació, i suport, consisteix en un cicle de revisió cada cinc anys (començant en 2023), que faci balanç de l'estat de la implementació del mateix respecte a l'objectiu dels 2 °C .

Hi ha la possibilitat d'incrementar els objectius en 2020 i es reconeix l'ús dels mercats de carboni per al compliment de fites i el dels embornals de carboni en el sector forestal en els països en desenvolupament.



3.2 Situació energètica d'Espanya

Al 2017 a Espanya, la potència instal·lada a partir dels principals combustibles fòssils va ser de 52.698 MW, mentre que la potència amb fonts renovables va ser de 51.818 MW. En quant a l'energia elèctrica generada, podem veure a la següent gràfica com predominen les fonts no renovables a l'Estat Espanyol.

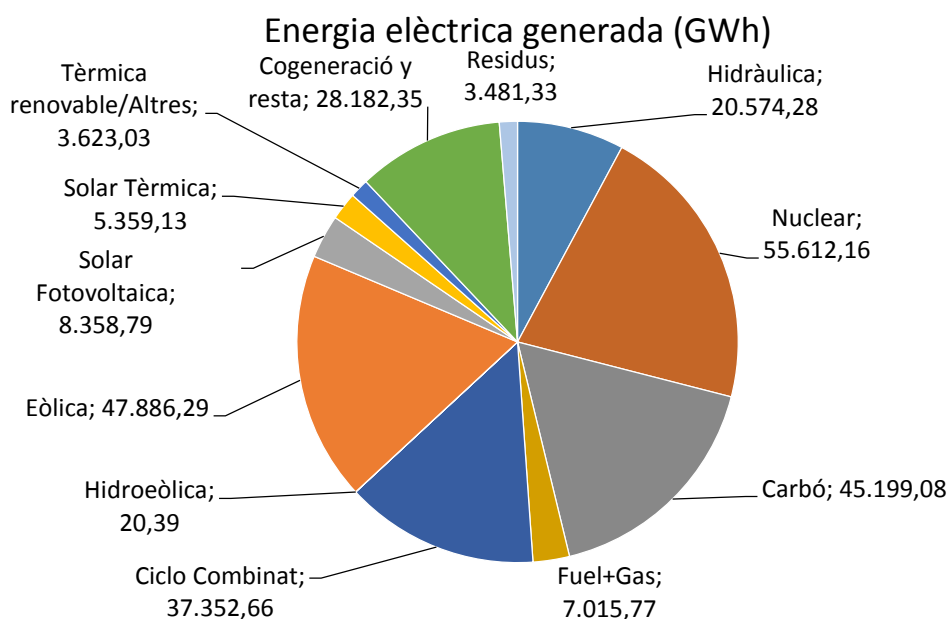


Figura 2.1 Energia elèctrica generada a Espanya l'any 2016. (Elaboració pròpia) (Font: REE)

La demanda d'energia elèctrica a Espanya, consolida l'evolució positiva iniciada el 2015, després de les caigudes provocades en els anys anteriors per la crisi econòmica. Concretament el 2017 va arribar als 268.163 GWh, un 1,3% més que l'any anterior (superant el creixement del 0,7% registrat el 2016). Per altra banda, la generació amb prou feines va obtenir una variació del 0,2% respecte a 2016, de manera que una part de la demanda es va cobrir amb el saldo importador 9.220 GWh resultant dels intercanvis d'energia amb altres països.

Pel que fa la generació a partir de fonts renovables, l'any 2017 va ser del 32.1%. En canvi, la generació a partir de fonts no renovables va ser de 67.9% del total d'energia produïda a Espanya.

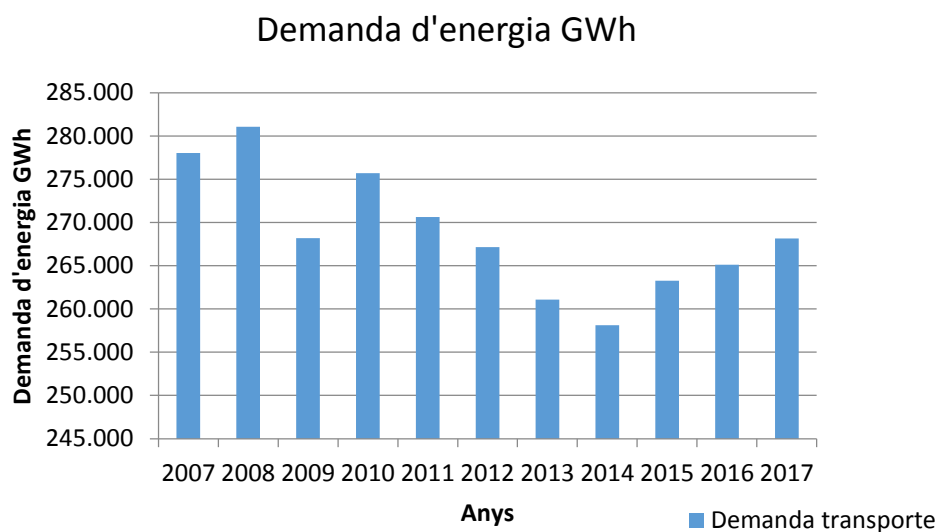


Figura 2.2 Diagrama de l'evolució de la demanda d'energia a Espanya 2007-2017 (Font:REE) (Elaboració pròpia)

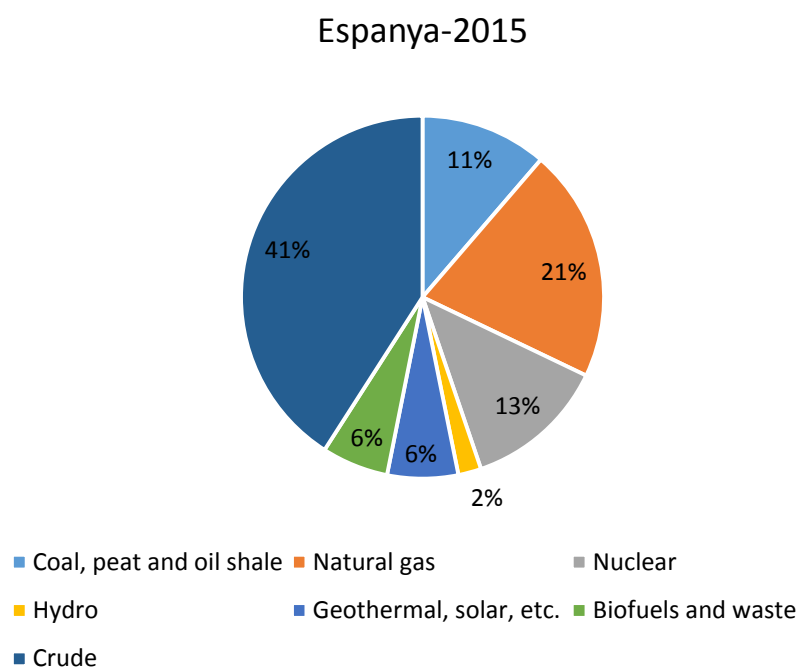


Figura 2.3 Diagrama del vector energètic d'Espanya a l'any 2015. (Font IEA)

Com a conseqüència de la crisi econòmica internacional a partir de l'any 2008, el govern espanyol comença a retallar en investigació i també en eliminar les primes a l'energia eòlica a Espanya, per tant, deixa el sector en una situació molt incerta. Com podem veure al següent gràfic, la potència instal·lada es queda estancada per culpa de les polítiques imposades des de el Govern central.

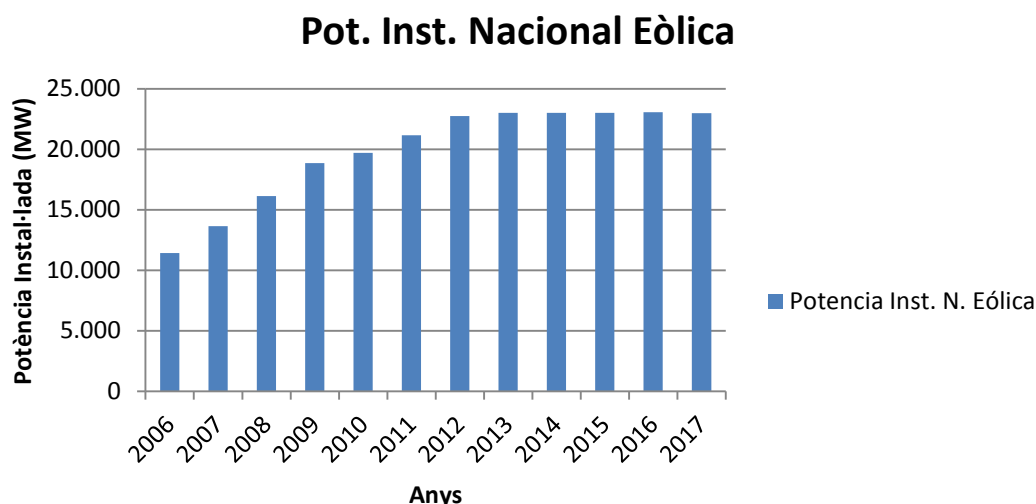


Figura 2.4 Potència Eòlica Instal·lada a nivell Nacional. (Font: REE) (Elaboració pròpia)

En l'actualitat hi ha uns 23.000 MW d'energia eòlica instal·lada a Espanya i les previsions del Pla de Foment de les Energies Renovables de 1999 pronosticaven que es superarien els 9.000 MW l'any 2010. Avui en dia l'energia eòlica és origen d'un 18.2% de l'electricitat generada a Espanya i som el quart país del món en potència instal·lada després d'Alemanya i els Estats Units i Xina. Per comunitats autònomes Castella i Lleó està per davant amb 5.600 MW instal·lats. Això equival a un 24.6% de la potència eòlica total a nivell Nacional.

3.2.1. Situació energètica a Castella i Lleó

L'energia eòlica segueix permetent a Castella i Lleó liderar el rànquing autonòmic de potència renovable instal·lada. Segons les dades de l'Estudi de l'Impacte macroeconòmic de les Energies Renovables a Espanya publicat per l'Associació d'Empreses d'Energies Renovables (APPA), la regió comptava a finals del 2016 amb un total de 6.474 MW de potència instal·lada, la gran majoria d'energia eòlica.

3.3 Fonts per la producció d'energia elèctrica d'una central convencional de carbó i una d'alternativa eòlica

3.3.1 El carbó

El carbó és una roca sedimentària d'origen orgànic, de color negre o marró fosc. Es fa servir principalment com a combustible fòssil pel seu elevat poder calorífic gràcies al fet que té un contingut majoritari de carboni. Es poden classificar pel percentatge en carboni que contenen, que està relacionat amb el percentatge d'humitat i d'impureses. Existeixen quatre tipus: **Torba**, **Lignit**, **Hulla** i **Antracita**.

Com hem esmentat anteriorment, la major part del carbó actual es formà durant el Carbonífer (fa 280 a 345 milions d'anys) de l'Era Primària. També en el Permià, Triàsic i Juràssic es van formar grans dipòsits. En el Cretaci es va formar lignit.



Figura 3.1 Diferents tipus de carbó en funció del seu contingut en aigua i carboni. (Font: *El Observatorio*)

3.3.1.1 El sector de la mineria del carbó a Espanya

Pel que fa aquest apartat parlarem sobre dades bàsiques d'ocupació en el sector del carbó i sobre l'origen del carbó que s'utilitza per a la producció d'electricitat a Espanya.

- **Ocupació**

El nombre de llocs de treball al sector de la mineria de carbó ha sofert una disminució significativa i constant durant les últimes tres dècades, passant de prop de 5.000 persones a finals de la dècada dels 80 a comptabilitzar gairebé 3.126 llocs de treball propis (Més 1.092 en empreses auxiliars) a la fi de 2014.

- **Carbó nacional enfront de carbó importat.**

En l'actualitat la major part del carbó que utilitzen les centrals tèrmiques espanyoles prové de l'estranger. Segons l'última dada publicada per Red Eléctrica de España (REE), el 70% del carbó que es va consumir a Espanya el 2013 per a la generació d'electricitat va ser importat. Tal com mostra la figura següent, el 2015 el carbó va ser importat, en ordre decreixent de volum d'importació, des de Colòmbia, Indonèsia, Rússia, Sud-àfrica, Estats Units i Austràlia, principalment.

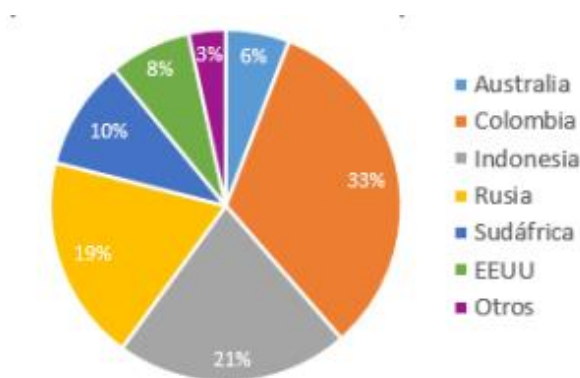


Figura 3.2 Procedència del carbó importat a Espanya al 2015. [Font: Eurostat]

La baixa competitivitat del carbó autòcton ha estat marcada principalment per un descens continuat del preu del carbó importat. El preu de venda del carbó a Europa ha baixat des dels 120 € / tona a mitjans de 2011 fins a l'entorn dels 50 € / tona el 2015.

3.3.1.2 Mètodes d'extracció de carbó

L'extracció del carbó es realitza mitjançant dos mètodes:

- **Mineria superficial moderna**

La mineria superficial o a cel obert recupera una proporció més gran de carbó que els mètodes subterranis. Les mines a cel obert poden arribar a cobrir àrees d'aproximadament diversos quilòmetres quadrats i utilitzar peces d'equips més llargues. En aquest procés de mineria, els explosius són usats primer per trencar a través de la superfície, o qualsevol material per sobre de l'àrea de mineria. Una vegada que els mantells de carbó es troben exposats, són trepats, fracturats i minats a fons en franges. El carbó és posteriorment carregat en grans camions per al transport cap a la planta preparadora de carbó o directament on serà utilitzat.

- **Mineria subterrània**

La majoria de les esquerdes de carbó són massa profundes per a la mineria a cel obert i requereixen la mineria subterrània, un mètode que actualment representa al voltant del 60 % de producció mundial de carbó.

En mineria subterrània, el mètode de càmeres i pilars avança al llarg de l'esquerda, mentre pilars i fustes es queden de peu per suportar el sostre de la mina. Una vegada que les mines de càmeres i pilars s'han desenvolupat a un punt d'aturada, una versió complementària la mineria de cambra i pilar, anomenada segona mineria o mineria de retirada, és comunament iniciada. Els miners remouen el carbó en els pilars, recuperant d'aquesta manera tant carbó de l'esquerda com sigui possible.

3.3.2 El recurs eòlic

- Què és el vent?

El vent és causat per diferències en la pressió de l'aire. Quan es dona una diferència de pressió, l'aire és accelerat des d'una pressió més gran a una de més petita. En un planeta en rotació l'aire és desviat per l'efecte de Coriolis, amb l'excepció a la zona exacta de l'equador. A escala mundial, els dos factors principals que causen vents a gran escala són l'escalfament diferencial entre l'equador i els pols i la rotació del planeta. Fora dels tròpics i per sobre dels efectes de fricció de la superfície, els vents a gran escala tendeixen a buscar un equilibri geostrofic. A prop de la superfície, la fricció fa que el vent sigui més lent del que seria en altres circumstàncies. La fricció de superfície també fa que els vents bufin cap a àrees de baixa pressió.

Els mapes de pressions mesurades s'efectuen unint les línies de punts d'igual pressió, les isòbares:

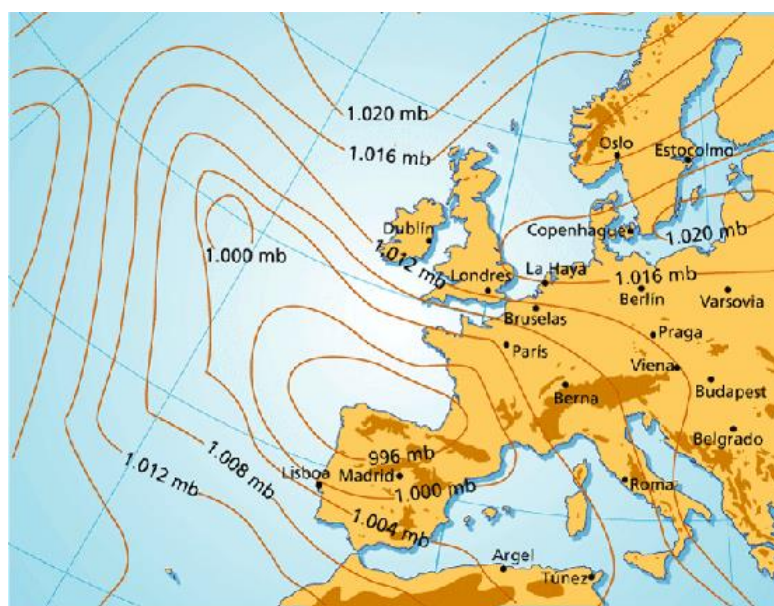


Figura 3.3 Mapa isobàric (Font: www.kalipedia.com)

El vent és considerat com a recurs energètic i per tant ha de ser analitzat des del punt de vista de la seva disponibilitat com a subministrament, té una sèrie de característiques a avaluar: és una font amb substancials variacions temporals, a petita i gran escala de temps, i especials, tant en superfície com en alçada, explicant a més amb una component aleatòria que afecta en gran part a la seva

variació total. Cal considerar que l'energia eòlica disponible per unitat d'àrea exposada al vent és proporcional al terme de la velocitat, de manera que petites variacions en la velocitat del vent comporten sensibles variacions en l'energia subministrada.

En l'altitud la forma usual de donar aquests mapes és una altra, per a una determinada pressió es representa l'altura a la que es produeix, mitjançant línies de nivell, com si es tractés d'un mapa topogràfic. Les línies de nivell, isohipses, varien en el mateix sentit que les de pressions.

En la imatge següent es pot veure un mapa amb isòbares i isohipses:

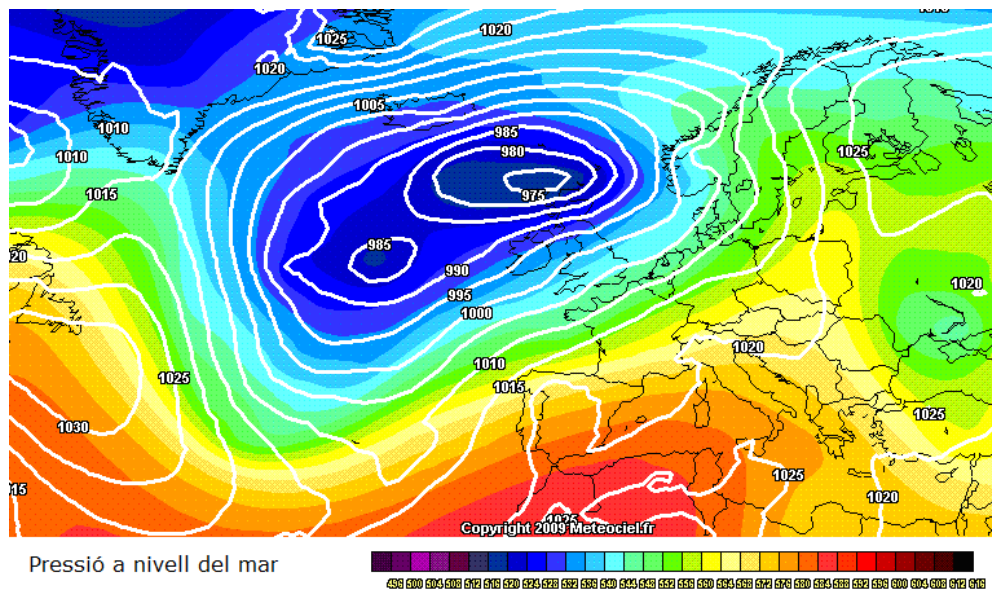


Figura 3.4 Mapa amb isòbares i isohipses (Font: www.meteored.com)

La velocitat del vent serà major quan major sigui el gradient de pressió. L'aire es mourà de les zones d'altres pressions a les de baixes pressions.

4. ESTUDI DE LA CENTRAL A SUBSTITUIR

4.1. Funcionament d'una central tèrmica de carbó

Les centrals tèrmiques convencionals produeixen energia elèctrica a partir de combustibles fòssils, com són el carbó, el fuel o el gas. A més, utilitzen tecnologies clàssiques per a la producció d'electricitat, és a dir, mitjançant un cicle termodinàmic d'aigua / vapor.

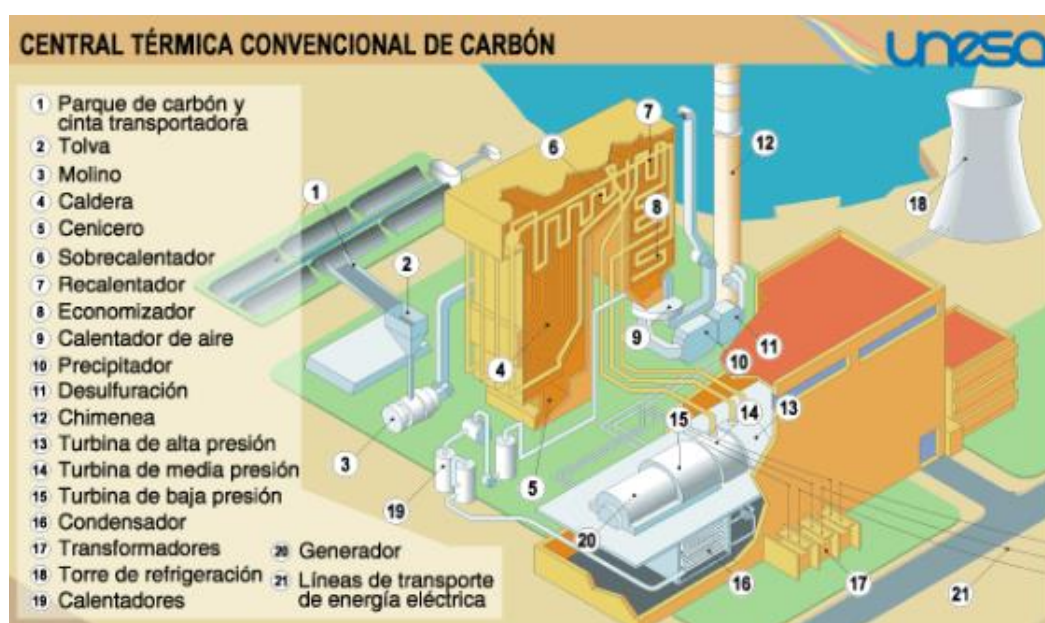


Figura 4.1 Parts que confeccionen una central tèrmica convencional. (Font: UNESA)

El carbó emmagatzemat al parc, prop de la central, és conduït mitjançant una cinta transportadora cap a una tremuja que alimenta al molí. Aquí el carbó és polvoritzat per augmentar la superfície de combustió i així millorar l'eficiència de la seva combustió. Un cop polvoritzat, el carbó s'injecta a la caldera, barrejat amb aire calent per a la seva combustió.

La caldera està formada per nombrosos tubs per on circula aigua, que és convertida en vapor a alta temperatura. Els residus sòlids d'aquesta combustió cauen al cendrer per a ser posteriorment transportats a un abocador. Les partícules fines i els fums es fan passar pels precipitadors i els equips

de dessulfuració , amb l'objecte de retenir un elevat percentatge dels contaminants que en cas contrari arribarien a l'atmosfera a través de la xemeneia .

El vapor d'aigua generat a la caldera acciona els àleps de les turbines de vapor, fent girar l'eix d'aquestes turbines que es mou solidàriament amb el rotor del generador elèctric .En el generador, l'energia mecànica rotatòria és convertida en electricitat de mitja tensió i alta intensitat, amb l'objectiu de disminuir les pèrdues del transport als punts de consum, la tensió de l'electricitat generada és elevada en un transformador , abans de ser enviada a la xarxa general mitjançant les línies de transport d'alta tensió .

Després d'accionar les turbines, el vapor d'aigua es converteix en líquid en el condensador. L'aigua que refrigera el condensador prové d'un riu o de la mar, i pot operar en circuit tancat, és a dir, transferint la calor extreta del condensador a l'atmosfera mitjançant torres de refrigeració o, en el circuit obert, descarregant dit calor directament al seu origen.

4.2 Obtenció de resultats de producció energètica

Primer de tot començarem per determinar la energia necessària a produir pel parc eòlic que substituiria la central convencional de carbó. En aquest cas, la central d'estudi comparatiu serà la central tèrmica **Compostilla II**.



Figura 4.2 Ubicació de la central tèrmica Compostilla II. (Font: ENDESA)

Aquesta tria es fonamenta principalment per la gran producció que aporta a la generació d'energia a nivell nacional. Segons dades del Ministeri d'Energia, Turisme i Agenda Social, la central de **Compostilla II** va aportar a la xarxa nacional l'any 2016 una energia de 3372.66 GWh amb una potència instal·lada de **1200 MW**. Segons el diari digital, "El Periódico de la Energía"[15], aquesta central es de les 10 més contaminants en tota Espanya a causa de la gran producció que té i el material que utilitza per la generació.

4.2.1 Desenvolupament

Per aquest treball s'ha utilitzat com a model de referència la central tèrmica Compostilla II, situada a Castella i Lleó, i les descripcions de les seves característiques tècniques s'han extret del Ministeri d'Energia, Turisme i Agenda Social.

Aquesta és una central que produeix energia elèctrica a partir de la combustió del carbó. Té 4 grups de generació que posseeixen les següents potències nominals:

GRUP II	GRUP III	GRUP IV	GRUP V
148 MW	337 MW	358 MW	355 MW

Taula 4.1 Potències nominals dels 4 grups de generació de Compostilla II

La central de **Compostilla II** té un temps de funcionament de 8670 h anuals. Amb una energia de sortida de 3372.66 GWh. [2]

A partir d'aquí, s'ha plantejat un parc eòlic equivalent, el qual té que tenir la mateixa energia elèctrica de sortida. Pel que fa les hores de treball, és improbable estar tot l'any un parc eòlic operatiu, per tant, aquest fet s'ha de tenir en compte a l'hora de calcular l'energia generada pel parc.

Per realitzar el càlcul de la potència necessària que ha de tenir el futur parc eòlic, ens hem basat en el parc eòlic **Era del Pico** [9], situat al terme municipal de Mallonseca, molt a prop de la central convencional a la que fem referència a aquest treball. Pel que fa al recurs eòlic necessari per la producció de **3372.66 GWh**, l'hem extret de les dades que ens proporciona Era del Pico.

CENTRAL ERA DEL PICO	Potència Instal·lada (MW)	Nº hores treballant	Energia produïda en una hora (MWh)
	11.9	-	4.11
Grup 1	8.5	-	2.31
Grup 2	3.4	-	1.8

Taula 4.2 Energia generada pel parc eòlic Era del Pico. (Elaboració pròpia)

Coneixent la potència instal·lada del parc eòlic i la generació bruta produïda durant un any podem extrapolar una potencia instal·lada en funció de la generació a que tenim que fer front.

Pel que fa la potencia a instal·lar obtenim els següents resultats:

Potència en MW necessària per produir 383,955 MWh	1116,93 MW
--	-------------------

Taula 4.3 Potència eòlica a instal·lar en funció de l'energia produïda per Compostilla II. (Elaboració pròpia)

A partir de la potència instal·lada, en funció de la potència individual de cada aerogenerador, podrem saber el número d'aerogeneradors a instal·lar al futur parc eòlic.

Potència per aerogenerador (MW)	Nº aerogeneradors
0.85	1308
2	556
5	223

Taula 4.4 Càlcul del número d'aerogeneradors a instal·lar en funció de la seva potència bruta.

A partir d'aquests resultats, es tindrà que calcular la superfície necessària per la instal·lació d'aquests aerogeneradors.

5. Estudi de la central substitutòria

5.1 L'aerogenerador i el parc eòlic

Com s'ha esmentat anteriorment el procés de càlcul del recurs eòlic permet obtenir les dades de potència extraïble així com d'energia generada segons l'aerogenerador escollit.

Per una correcta elecció de l'aerogenerador és necessari conèixer els diferents tipus d'aerogenerador comercialitzats així com les seves tecnologies de generació.

El capítol de **estudi de la central a substituir**, s'inicia amb el procés de càlcul de la potència extraïble del vent per després aportar els coneixements necessaris sobre els components dels aerogeneradors així com els tipus existents en el mercat i les seves tecnologies de generació.

5.1.1 Funcionament d'un aerogenerador

Degut a la gran varietat d'aerogeneradors que podem trobar a l'actualitat, ens centrarem en realitzar una descripció detallada dels seus components sense centrar-nos en cap marca concreta. Actualment els generadors més utilitzats són els d'eix horitzontal amb tres pales, i torre tubular.

El rotor d'eix horitzontal es caracteritzen per fer girar les seves pales en direcció perpendicular al vent incident. Són els més habituals ja que ofereixen majors potències que els d'eix vertical, encara que són més costosos.

Les turbines d'eix horitzontal es classifiquen en turbines amb rotor multipala o turbines lentes, i rotor tipus hèlix o turbines ràpides. Les turbines lentes es caracteritzen per tenir un nombre de pales de entre 6 i 24 i per tant una solidesa elevada. Presenten elevats parells d'engegada i una velocitat de gir reduïda, per això la seva principal aplicació és el bombeig d'aigua i no s'utilitzen per a la generació d'energia.

Les turbines ràpides giren a una velocitat major que les turbines multipala. La velocitat lineal en la punta de la pala és de entre 6 a 14 vegades la velocitat del vent incident, per això, les turbines ràpides són les més apropiades per a la generació d'energia elèctrica. Els models més utilitzats són els de tres pales ja que, tenen una major estabilitat que els d'una o dues pales i un major rendiment energètic.

Els aerogeneradors d'eix horitzontal es poden dividir segons estiguin constituïts per **una, dues, tres** pales o tipologia **multipala**:

- **Una pala**

Al tenir només una pala aquestes turbines necessiten un contrapès en l'altre extrem per equilibrar-se. Tenen una velocitat de gir molt elevada, però el seu principal inconvenient és que introdueixen en l'eix esforços variables que retallen la vida útil de la instal·lació.



Figura 5.1 Aerogenerador monopala. (Font: Mind42)

- **Dues pales**

Els aerogeneradors de dues pales tenen l'avantatge sobre els de tres, de resultar més econòmics i tenir un menor pes. El seu principal inconvenient és que necessiten una velocitat de gir major per a produir la mateixa energia de sortida.



Figura 5.2 Aerogenerador bipala. (Font: Energia eòlica blogspot)

- **Tres pales**

La majoria dels aerogeneradors moderns tenen dissenys de tres pales, amb el rotor a sobrevent. Utilitzen motors elèctrics per els mecanismes d'orientació. Són els models que ofereixen una major estabilitat estructural i aerodinàmica, menor emissió de soroll i major rendiment energètic.



Figura 5.3 Aerogenerador de 3 pales. (Font: wikipedia)

- **Multipala**

Constituïts per entre 6 i 24 pales, presenten una elevada solidesa. Com s'ha esmentat anteriorment no tenen aplicacions per a la producció d'energia.



Figura 5.4 Aerogenerador multipala. (Font: *fisicajuanquimica.blogspot*)

Tots els aerogeneradors han de disposar d'algun mètode de **control de la potència** generada per tal d'evitar que es produeixin danys en els diferents components en cas de vent excessiu. Segons el dispositiu que fan servir per controlar la potència, es poden classificar de la següent manera:

- **Sistemes de pas variable**

Segons aquest mètode les pales poden variar el seu angle d'incidència respecte el vent. Quan la potència generada és excessiva, les pales comencen a girar sobre el seu eix longitudinal fins adoptar la posició anomenada de bandera. En aquesta posició la resistència al vent és mínima, així com el parell i la potència generada. Un sistema electrònic controla la posició de les pales en funció de la velocitat del vent.

El mecanisme de canvi d'angle de pas funciona de forma hidràulica. Aquest tipus de sistemes augmenten la vida útil de la instal·lació, així com el seu rendiment. A més a més possibiliten l'aprofitament de règims de vents baixos.

- **Regulació passiva per pèrdues aerodinàmiques**

Els aerogeneradors de **regulació passiva** per pèrdues aerodinàmiques tenen les pales instal·lades en un angle fix. Tot i això el perfil de la pala està dissenyat per assegurar que, en el moment que la velocitat del vent sigui massa alta, es creï una turbulència en la part de la pala que no dona al vent. Aquesta pèrdua de sustentació evita que la força ascensional de la pala actuï sobre el rotor. A l'augmentar la velocitat del vent, l'angle d'incidència de la pala també augmentarà fins arribar al punt de començar a perdre sustentació.

Aquest tipus de sistemes eviten les parts mòbils al rotor i un complex sistema de control. Tenen l'inconvenient que el disseny aerodinàmic de les pales és molt complex.

- **Regulació activa per pèrdua aerodinàmica**

Les màquines de regulació activa per pèrdua aerodinàmica són semblants a les de regulació per sistemes de pas variable, en el sentit de que les dues tenen pales que poden canviar el seu angle de pas.

La principal diferència entre elles s'observa quan la màquina amb regulació per pèrdua aerodinàmica arriba a la seva potència nominal: En el moment que el generador es vagi a sobrecarregar, la màquina girarà les pales en direcció contrària a la que ho faria la màquina amb sistema de pas variable. Augmentarà l'angle de pas de les pales per poder ubicar-les en una posició de major pèrdua de sustentació i poder consumir l'excés d'energia del vent.

El principal avantatge d'aquest sistema és que possibilita el funcionament de la màquina quasi exactament a potència nominal a totes les velocitats del vent.

A l'aerogenerador, l'energia cinètica del vent proporciona energia mecànica mitjançant una transmissió que fa girar el rotor del generador. Aquest moviment rotacional es transforma després amb energia elèctrica.

Encara que els aerogeneradors funcionen de forma aïllada, el més normal és trobar-los agrupats en parcs eòlics, separats uns dels altres a una distància que vagi en funció de les turbulències generades per el moviment de les pales i l'impacte ambiental. Per aportar energia elèctrica a la xarxa, els aerogeneradors han d'estar sincronitzats, de tal forma, que la freqüència de la corrent generada sigui la mateixa que la freqüència de la xarxa elèctrica.

5.1.2 Components de l'aerogenerador escollit

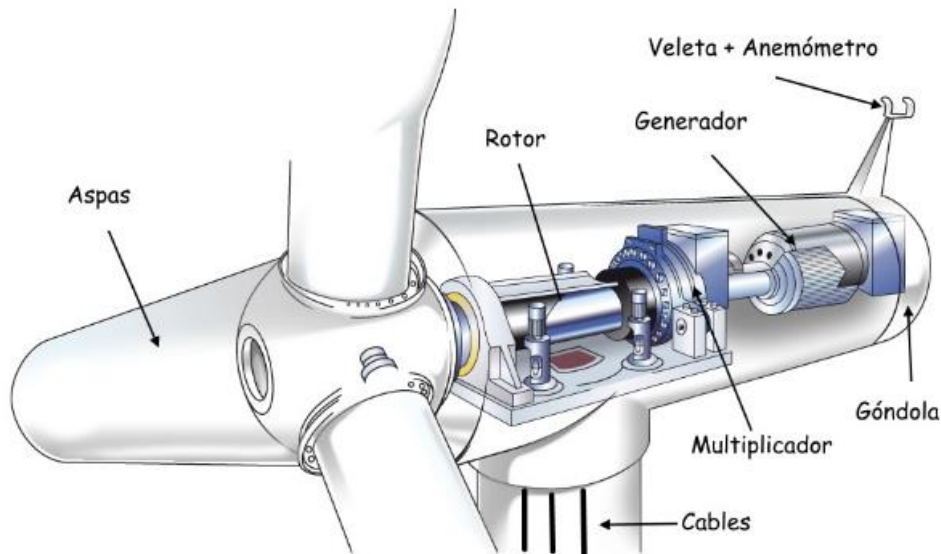


Figura 5.5 Parts d'un aerogenerador. (Font: Pertesdel.com)

En els aerogeneradors d'eix horitzontal que farem servir a aquest treball, la **torre** és un dels components principals:

La torre suporta la gòndola i el rotor. En els grans aerogeneradors les torres tubulars poden ser d'acer, de gelosia o de formigó i a continuació tractarem breument cada una d'elles.

- **Torre tubular d'acer**

Aquest és el tipus de torre més utilitzat en l'actualitat. El criteri habitual de construcció d'aquestes torres és mitjançant la unió de diversos trams cilíndrics. El nombre usual de trams per a torres de més de 60 metres és de 2 o 3. Les torres tenen un disseny troncocònic, és a dir, amb un diàmetre creixent cap a la base, per tal d'augmentar la resistència i estalviar material

- **Torre de gelosia**

Són fabricades utilitzant perfils d'acer soldats. El seu principal avantatge és el seu menor cost econòmic respecte a les altres torres, ja que, només necessiten la meitat de material que una torre tubular amb la mateixa rigidesa. Pràcticament no s'utilitzen degut al seu impacte visual a distàncies properes.

- **Torre tubular de formigó**

Les torres de formigó es poden realitzar amb formigó armat o bé amb formigó pretensat. El formigó pretensat presenta millors característiques pels dissenys de torres d'elevada rigidesa i és una opció econòmicament competitiva amb les torres tubulars d'acer quan aquestes s'han de dissenyar amb elevada rigidesa.

Independentment del disseny a escollit, quant major sigui l'alçada de la torre, major serà la producció d'energia, encara que s'ha de tenir en compte que augmentar l'alçada, augmenta el cost i la dificultat per a la instal·lació dels equips.

Així l'alçada òptima de la torre serà funció del cost per metre de torre, de la variació del vent amb l'alçada al lloc d'implantació i del preu de venda de l'energia.

La **gòndola**, ubicada en la part superior de la torre, és l'habitatge on es troben els elements elèctrics i mecànics necessaris per tal de convertir el gir del rotor en energia elèctrica.

Es troba unida a la torre per una corona dentada que permet l'orientació del rotor en la direcció del vent.

En la seva part exterior s'instal·la un anemòmetre i un penell connectats als sistemes de control de l'aerogenerador.

Les gòndoles es fabriquen en acer forjat i plaques de fibra de vidre. El rotor és el conjunt de components d'un aerogenerador que giren fora de la gòndola. Està format principalment per tres components, que són:

Les **pales**, la **boixa** i el **mecanisme de canvi de pas** de les pales.

- **Boixa**

És l'element d'unió entre les pales i el sistema de rotació (eix). Les boixes es poden classificar segons siguin rígides o basculants.

En els sistemes amb boixa rígida les pales es cargolen a la boixa i aquesta es fixa rígidament a l'eix de gir. Les pales es comporten respecte al sistema de gir com una biga en voladís que transmet totes les càrregues que rep directament al tren de potència.

En els sistemes amb caixa basculant, la caixa està unida al tren de potència mitjançant un suport que li permet pivotar lliurement. Aquesta peça permet moviments d'angles menors a $\pm 10^\circ$ en direcció perpendicular al rotor respecte al pla de rotació. Aquest tipus de sistemes és utilitzat habitualment en aerogeneradors de dues pales.

- **Pales**

Les pales són els elements encarregats de transformar la velocitat del vent incident en moviment rotatori a l'eix.

En les turbines ràpides un augment del nombre de pales suposa un increment del coeficient de potència màxim. El pas d'una a dues pales suposa un increment del 10%, de 2 a 3 pales un 3-4%, i de 3 a 4 només un 1%, per aquesta raó no és rentable utilitzar turbines de 4 pales.

En el funcionament dels aerogeneradors ràpids el perfil aerodinàmic és un dels paràmetres de disseny més determinants. Els perfils més utilitzats són els mateixos que s'utilitzen de forma generalitzada en la indústria aeronàutica.

El material més utilitzat en l'actualitat per a la construcció de les pales és la fibra de vidre amb resina de polièster. El seu principal avantatge és la versatilitat de fabricació i les seves bones propietats estructurals i de resistència a la fatiga. Tenen també un baix coeficient de dilatació i una reduïda conductivitat elèctrica el que fa que aquests materials siguin interessants per a la protecció del sistema contra els raigs.

- **Mecanisme de canvi de pas**

La majoria d'aerogeneradors actuals incorporen dispositius capaços de fer girar la pala al voltant del seu eix longitudinal. Aquests dispositius tenen una funció doble, per una part controlar la potència i velocitat de gir del rotor i per una altra és capaç de frenar aerodinàmicament el sistema en cas d'avaría.

Existeixen diferents sistemes de canvi de pas explicats en l'apartat de **sistemes de pas variable**.

L'eix de baixa velocitat és el que es troba acoblat a la caixa. Gira directament a la velocitat de gir de les pales, provocada per la velocitat del vent incident.

En l'extrem oposat, l'eix de baixa velocitat es troba acoblat a la caixa multiplicadora.

La **caixa multiplicadora** és un element necessari per a tots aquells aerogeneradors que tenen un règim de gir diferent entre el rotor eòlic i el generador elèctric.

L'objectiu de la caixa multiplicadora està ben definit, augmentar les revolucions per minut que ofereix l'eix de baixa velocitat per transmetre a l'eix d'alta velocitat i d'aquesta manera adaptar la freqüència del generador a la de la xarxa sense que aquest hagi de tenir un nombre de pols molt elevat.

Un dels paràmetres de disseny de les caixes multiplicadores és la relació de transmissió, que és el quocient entre la velocitat de gir de l'eix ràpid i la del lent. Quant menor sigui aquesta relació menor serà la mida de la caixa i el seu cost.

Per a reduir la relació de transmissió es pot disminuir la velocitat del generador augmentant el nombre de pols o augmentar la velocitat de gir de la turbina. Actualment la reducció de la mida de la caixa no és un problema de disseny crític. Existeixen caixes multiplicadores d'elevada potència (2MW) i relació de transmissió (1:100) amb rendiments i fiabilitats molt elevats.

Els engranatges de les caixes poden ser rectes o helicoïdals. Els engranatges rectes s'utilitzen en caixes multiplicadores d'eixos paral·lels mentre que els engranatges helicoïdals, que tenen un disseny més sofisticat, s'utilitzen en caixes de tipus planetari i ofereixen una relació de multiplicació major. També és possible tenir caixes de multiplicació híbrids amb engranatges rectes i helicoïdals.

Les turbines necessiten almenys dues o tres etapes de multiplicació. L'eix d'alta velocitat es troba acoblat a la caixa multiplicadora i al generador elèctric. Gira a la velocitat que li transmet la caixa multiplicadora, molt major que la de l'eix de baixa velocitat, per tal de no fer necessari la instal·lació d'un generador amb un nombre elevat de pols.

La funció principal del fre mecànic és mantenir bloquejat l'eix de gir durant les operacions de posada en marxa i manteniment de l'aerogenerador.

La seva constitució física consisteix en un disc que gira solidari a l'eix de transmissió i unes sabates de fre que freguen amb el disc quan s'activen ja sigui per via elèctrica, hidràulica o mecànica. A més a més de la funció de bloqueig alguns dissenys de frens mecànics s'utilitzen per contribuir al fre dinàmic del rotor eòlic durant el procés de parada d'emergència.

Utilitzar el fre mecànic per a contribuir als processos de parada dinàmica només està justificat en turbines de baixa o mitja potència. En màquines d'elevada potència (properes al MW) el fre mecànic

no pot contribuir a la parada dinàmica ja que suposaria unes dimensions del disc de frenada excessives.

Aquest component es pot ubicar tant en l'eix de baixa velocitat com en el d'alta. En l'eix d'alta velocitat la potència mecànica generada pel rotor es transmet amb una elevada velocitat de gir i un parell reduït, el que permet diàmetres de fre més reduïts. L'inconvenient principal d'aquest sistema és que les dents de la caixa multiplicadora estaran sotmesos a esforços durant les parades.

Instal·lar el fre mecànic en l'eix de baixa velocitat és apropiat per turbines de baixa potència, en turbines d'elevada potència aquesta ubicació provocaria unes dimensions excessives de fre.

El **generador** és l'element central del sistema elèctric dels aerogeneradors i l'element a partir del qual es dimensionen la resta d'elements i el sistema de control. Com a generador en les turbines de producció eòliques s'utilitzen quasi exclusivament les màquines de corrent altern per la seva millor relació potència/pes, la seva capacitat de produir a tensions elevades, i pels seus menors costos de manteniment front les màquines de corrent continu.

Existeixen dos tipus bàsics de generadors de corrent altern: **màquines asíncrones** o **d'inducció**, i **màquines síncrones**.

En aquesta apartat no es pretén donar a conèixer en profunditat cadascuna d'aquestes màquines, sinó, mostrar el seu ús en els aerogeneradors.

- **Generador asíncron en sistemes eòlics**

El principal inconvenient del generadors asíncrons és la necessitat de consumir energia reactiva per a la seva excitació magnètica. Com a solució a aquest problema el procediment habitual és instal·lar una bateria de condensadors ja sigui en bornes de la màquina o en el punt de connexió a la xarxa.

La constitució més senzilla de generador asíncron és el generador asíncron amb rotor de gàbia. En aquest tipus de generador el rotor està constituït per una sèrie de barres de coure o alumini connectades en curtcircuit per dos anells. L'esquema de la instal·lació és el següent:

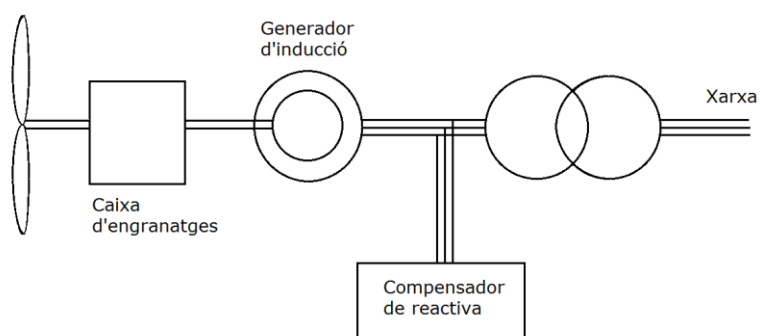


Figura 5.6 Esquema del Generador d'inducció amb compensador de reactiva.

Una variant d'aquests models d'instal·lació és la utilització d'un rotor debanat que permet afegir resistències en el rotor per poder variar la velocitat en un petit rang (10% respecte a la de sincronisme), controlada per un convertidor electrònic.

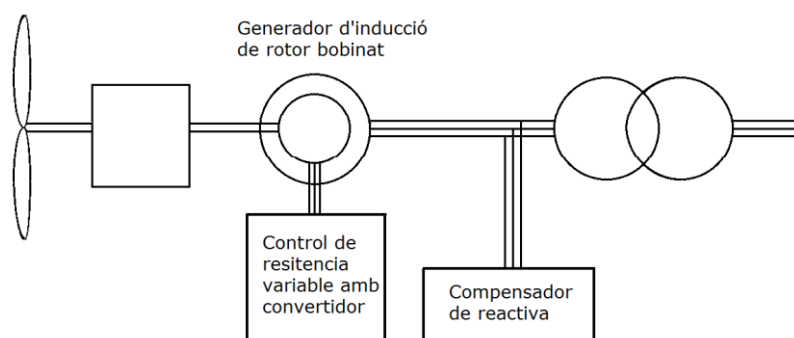


Figura 5.7 Esquema d'un Generador d'inducció de rotor bobinat amb control de resistència variable.

La tercera variant en quan a la utilització de generadors asíncrons és aquella que permet denominar al sistema com de velocitat variant. En aquest cas es tracta d'un generador asíncron doblement alimentat i amb convertidor electrònic entre el rotor i la xarxa.

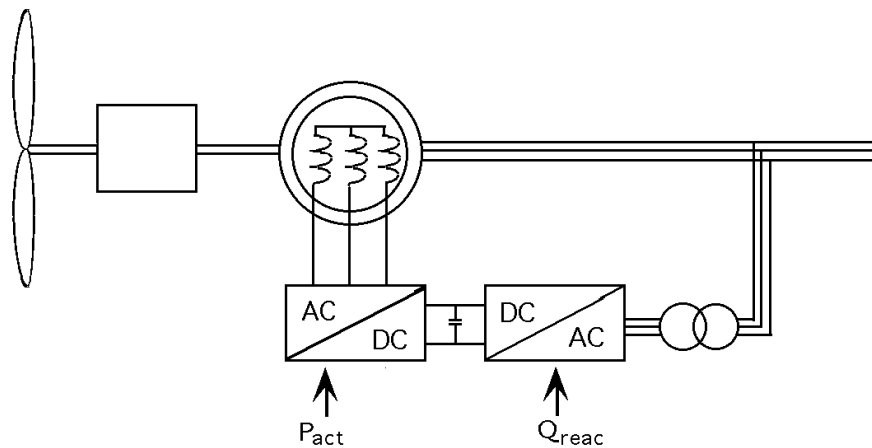


Figura 5.8 Generador d'inducció doblement alimentat.

Un altre sistema denominat de velocitat variant és la utilització d'un generador asíncron de rotor de gàbia, amb l'estator connectat a la xarxa a través d'un convertidor. Així la sortida del generador a freqüència variable, es connecta a un convertidor format per rectificador i inversor i, aquest, es connecta a la xarxa a la seva freqüència.

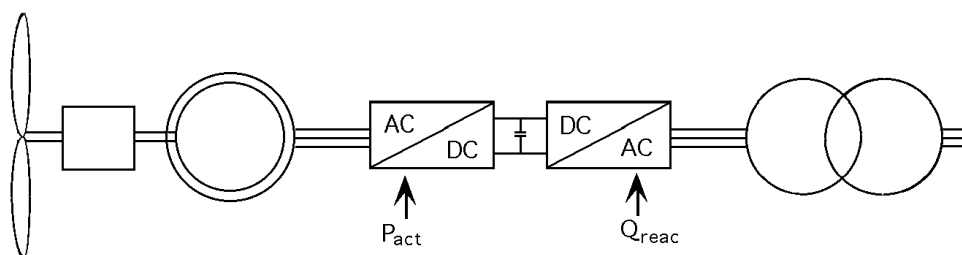


Figura 5.9 Generador d'inducció de rotor de gàbia amb convertidor.

- **Generador síncron en sistemes eòlics**

El principal problema d'utilitzar generadors síncrons en els sistemes eòlics connectats directament a la xarxa és que, al ser de freqüència constant, la velocitat de gir també ha de ser-ho. Això provoca esforços mecànics importants al sistema de transmissió mecànica i oscil·lacions de la potència elèctrica generada. Per això els generadors síncrons s'utilitzen connectats a la xarxa mitjançant un convertidor de freqüència que permet independitzar la freqüència del generador de la de la xarxa, i que aquest treballi a velocitat variable.

Un primer esquema de muntatge utilitzant generador síncron, és el format per un generador síncron multipol i el convertidor electrònic. L' utilització d'un generador amb elevat nombre de pols ofereix la possibilitat de reduir les etapes de multiplicació de la caixa multiplicadora o inclús eliminar-la, encara que augmenta les mides de la màquina i el seu cost. És necessària també la utilització d'un petit convertidor per a l'excitació del debanat en corrent continu.

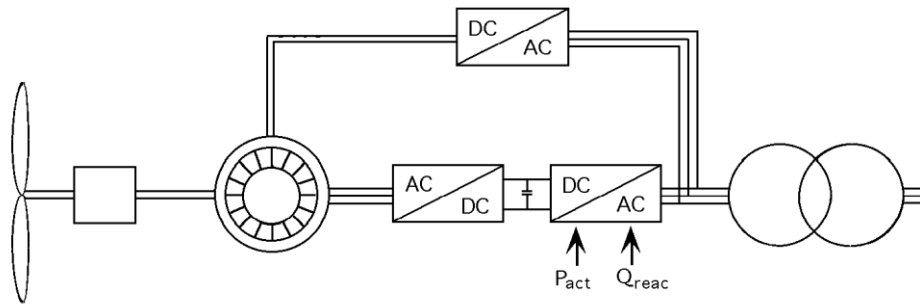


Figura 5.10 Generador síncron multipol amb convertidor i excitació del rotor a través del petit convertidor.

Una altra possibilitat és la utilització d'un generador síncron d'imants permanents. En aquest cas no es necessita l'alimentació del circuit inductor ja que aquest està format per imants. El problema d'aquest muntatge és que les màquines d'imants permanents no poden oferir grans potències.

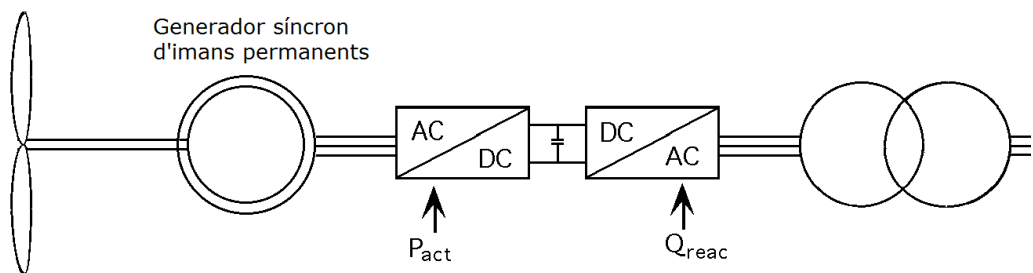


Figura 5.11 Generador síncron d'imants permanents amb convertidor.

El **mecanisme d'orientació** és el dispositiu que gira automàticament la gòndola de l'aerogenerador per posicionar-la en cada moment en la posició en la que la direcció del vent incident és la més perpendicular al pla de gir de les pales.

Els mecanismes d'orientació es poden dividir entre **actius** i **passius**. En els sistemes passius s'utilitza un penell o molins auxiliars per orientar l'aerogenerador, encara que com s'ha vist anteriorment no s'utilitzen per a turbines de producció d'energia.

Els sistemes d'orientació actius utilitzen motors elèctrics o sistemes hidràulics per efectuar el moviment de la gòndola. Aquests sistemes són els utilitzats per aerogeneradors ubicats a sobrevent. Normalment estan formats per dos motors, un de gir a dretes i un altre de gir a l'esquerre. Els motors accionen un pinyó que mou l'engrenatge tipus corona sobre el que es troba unida rígidament la gòndola.

El mecanisme d'orientació actiu acostuma a dur incorporat un dispositiu per a determinar la torsió dels cables de potència que baixen des de la sortida del generador a la base de la torre.

El **controlador** d'una turbina eòlica consta de diversos ordinadors que supervisen les condicions de la turbina i recullen estadístiques sobre el seu funcionament.

El controlador electrònic governa el sistema d'orientació i possibilita la transmissió de dades de la turbina a un centre de control on es pot realitzar el monitoratge de tot el parc.

La **unitat de refrigeració**, és l'element encarregat de la refrigeració del generador elèctric. Per a la refrigeració del generador elèctric el més habitual és utilitzar ventiladors elèctrics.

La unitat de refrigeració conté a més a més una unitat de refrigeració emprada per a refrigerar l'oli de la caixa multiplicadora.

L'anemòmetre i el penell s'utilitzen per a mesurar la velocitat i la direcció del vent. Les senyals electròniques de l'anemòmetre són utilitzades pel controlador electrònic per a connectar l'aerogenerador quan la velocitat del vent supera el mínim necessari (5 m/s habitualment) i aturar la rotació de les pales quan la velocitat del vent excedeixi el límit (25 m/s habitualment).

Els senyals del penell són utilitzats pel controlador electrònic per a conèixer la direcció del vent i orientar així l'aerogenerador.

5.1.3 Distribució de parcs eòlics

La selecció de l'emplaçament és una de les decisions més importants alhora de dissenyar un parc eòlic, ja que determinarà el rendiment del parc, per tant, l'energia que podrà produir. Una mala selecció de l'emplaçament podria provocar per exemple, pèrdues en la línia d'evacuació, baix rendiment en els aerogeneradors per ràfegues massa altes...

El disseny del parc eòlic està generalment dissenyat amb un software de parcs eòlics professional. Aquestes eines permeten una iteració i optimització efectives dels paràmetres clau per al seu disseny.

L'objectiu fonamental és maximitzar la producció d'energia, minimitzar els costos de capital i els costos operatius i mantenir-se dins de les restriccions imposades al territori.

Ja que les restriccions i els costos estan subjectes a cert nivell d'incertesa, el procés d'optimització també busca minimitzar el risc. La primera tasca és definir les restriccions sobre el desenvolupament:

- Capacitat màxima instal·lada
- Frontera del lloc
- Distàncies de carreteres, línies aèries, ...
- Restriccions ambientals
- Ubicació d'habitatges sensibles al soroll, si n'hi ha, i criteris d'avaluació.
- Ubicació de punts de vista sensibles a la visió, si n'hi ha, i criteris d'avaluació.
- Distàncies mínimes de la turbina, (en particular, aquestes es veuen afectades per la turbulència).

Els factors que més poden afectar la ubicació de la turbina són:

- Optimització de la producció d'energia.
- Influència visual.
- Soroll.
- Càrrega de la turbina.

5.1.3.1 Optimització de la producció d'energia

Un cop definides les restriccions del parc eòlic, es pot optimitzar el disseny del parc. Aquest procés també s'anomena micro-estructuració de parcs eòlics. Com s'ha comentat anteriorment, l'objectiu d'aquest procés és maximitzar la producció d'energia del parc eòlic a la vegada que es minimitza la infraestructura i els costos d'explotació. Per a la majoria de projectes, l'economia és sensiblement més sensible als canvis en la producció d'energia que no pas costos d'infraestructura. Per tant, és convenient utilitzar la producció d'energia com a paràmetre de disseny dominant.

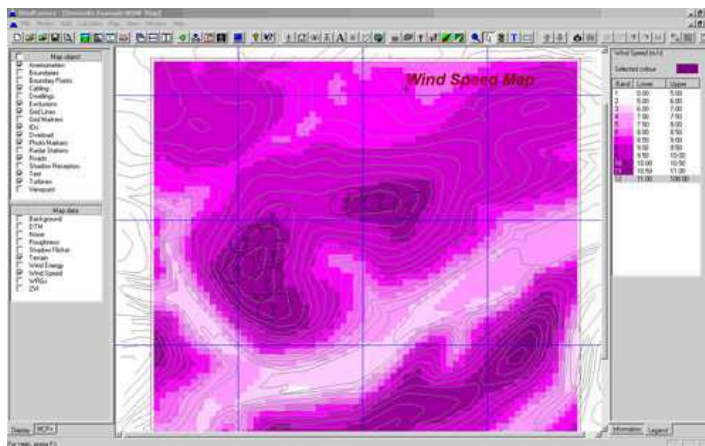


Figura 5.12 Captura de pantalla d'una WFDT. (Font: Wind Farm Design Tools)

Les zones més fosques d'ombres representen major velocitat del vent. Les turbines estan representades pels petits marcadors amb un número a sota.

5.1.3.2 Impacte visual

En molts països, la influència visual d'un parc eòlic en el paisatge és un tema important. L'ús de les eines de disseny computacional permet identificar des d'on el parc eòlic serà visible. Les eines també es poden utilitzar per proporcionar visualitzacions, per facilitar la producció de fotomuntatges i per predir el parpelleig de soroll i l'ombra que es deriva d'un desenvolupament proposat. Aquests són sovint aspectes clau de l'avaluació ambiental d'un projecte.

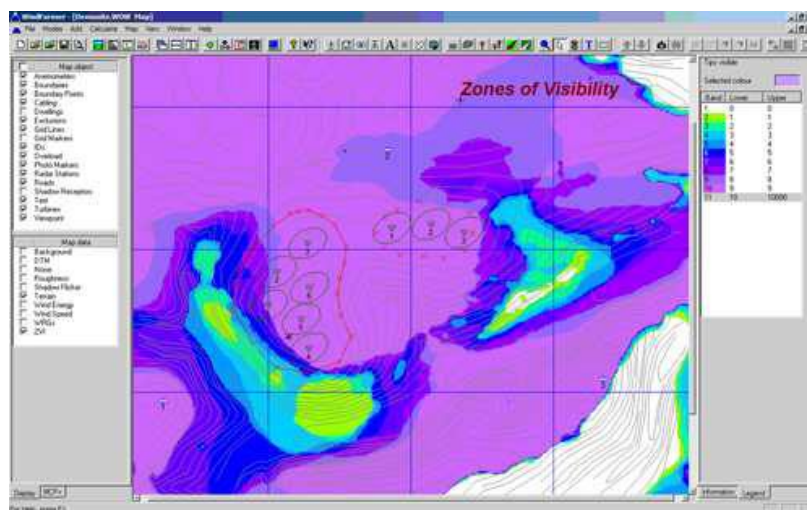


Figura 5.13 Zones de visibilitat dels aerogeneradors amb el software. (Font: Wind Farm Design Tools)

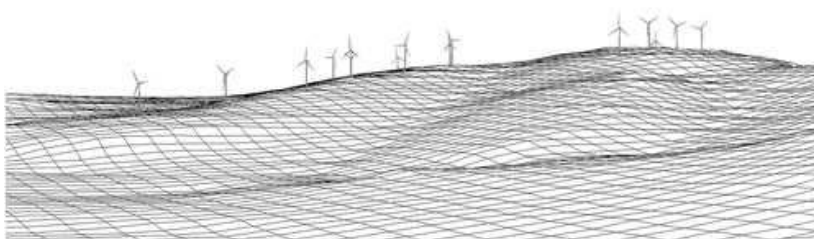


Figura 5.14 Foto muntatge de la distribució del aerogeneradors amb el software. (Font: W.F.D. Tools)

5.1.3.3 Soroll

En països densament poblats, el soroll a vegades pot ser un factor limitat per a la capacitat de generació que es pot instal·lar en qualsevol lloc en particular. El soroll produït per les turbines operatives s'ha vist reduït significativament en els últims anys pels fabricants d'aerogeneradors, però continua sent una restricció. Això és per dos motius principals:

- A diferència de la majoria de les altres tecnologies de generació, sovint es troben turbines eòliques a àrees rurals, on els nivells de soroll de fons poden ser molt baixos, especialment durant la nit. El temps crític és quan la velocitat del vent es troba a la part inferior del rang operatiu de la turbina, ja que el soroll de fons induït pel vent és més baix, de manera que el soroll de les turbines es pot sentir amb més claredat.
- Les principals fonts de soroll (la caixa de canvis , el generador,...) són elevades, per la qual cosa no es seleccionen per topografia o obstacles.

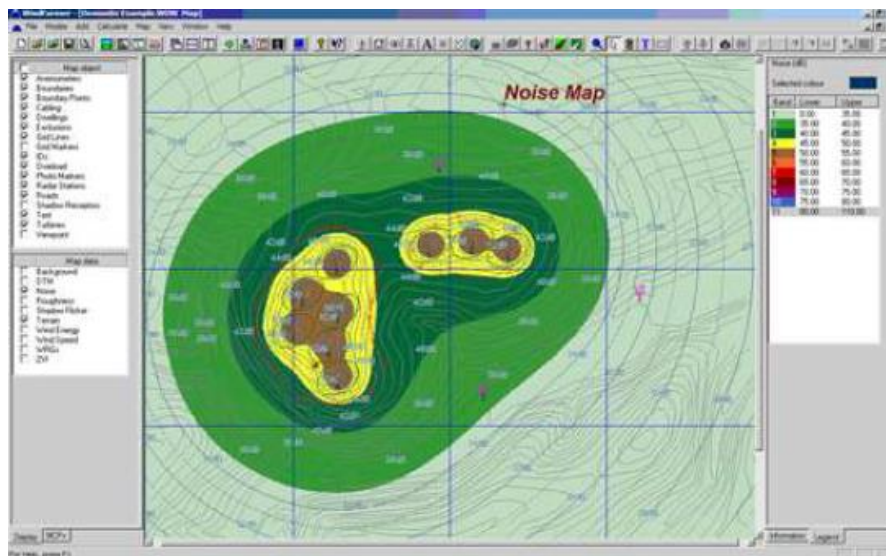


Figura 5.15 Mapa del soroll generat pels aerogeneradors. (Font: W.F.D. Tools)

5.1.3.4 Càrrega de la turbina

Un element clau del disseny és l'espaiat mínim que la turbina utilitza. Per assegurar-se que les turbines no s'utilitzen fora de les seves condicions de disseny, s'haurien d'obtenir els espais mínims de turbina acceptables del proveïdor de turbina i adherir-se a ells. L'espai adequat per a les turbines depèn en gran mesura de la naturalesa del terreny i la direcció del vent al lloc a realitzar la instal·lació del parc eòlic.

- Si les turbines estan més a prop de 5 diàmetres del rotor en la direcció del vent més freqüent, és probable que es produeixin pèrdues d'estela massa elevades.
- Per a les àrees amb vent predominantment unidireccional, les distàncies més grans entre les turbines en la direcció del vent dominant i els espais més ajustats perpendiculars a la direcció del vent dominant, resultaran ser més productius.

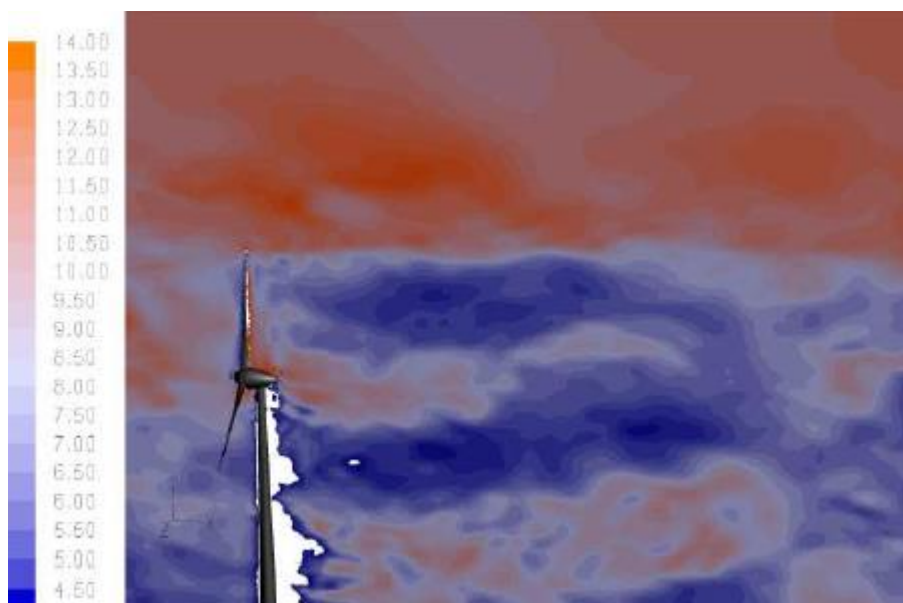


Figura 5.16 Simulació de l'estela d'un aerogenerador. (Font: W.F.D. Tools)

Els colors taronja i vermell representen una velocitat de vent (m/s) més ràpida i els blaus representen una velocitat de vent més lenta.

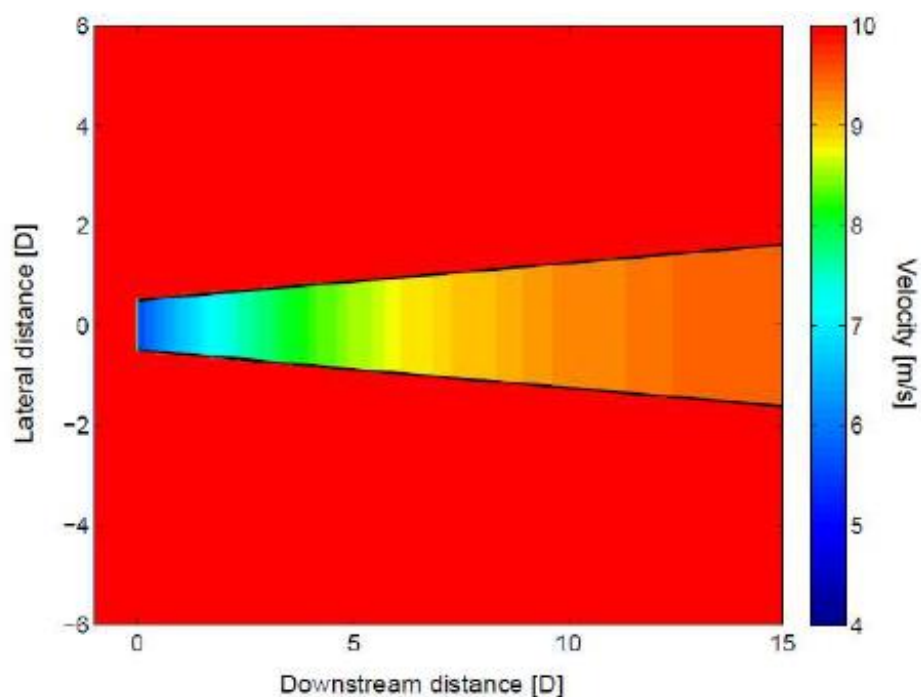


Figura 5.17 Estela del vent darrera la turbina, amb una velocitat màxima de vent de 10 m/s. (Font: GEOEE)

Com podem observar a la figura, la velocitat del vent tornarà a ser uns 10 m/s a partir d'una distància de 15 vegades el diàmetre del rotor de la turbina.

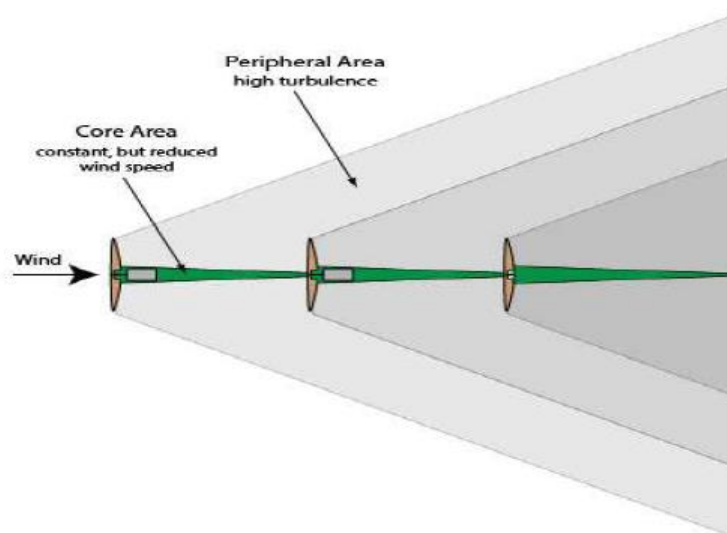


Figura 5.18 Distribució dels aerogeneradors en funció de la velocitat del vent. (Font: GEOEE)

5.2 Determinació de la superfície del parc eòlic

A partir de les dades que sabem de l'apartat anterior i les especificacions tècniques de la distribució dels aerogeneradors, hem de determinar la distribució òptima d'aquests.

Realitzarem un model a escala del perfil de l'aerogenerador amb el programa de disseny **Autocad** amb les separacions òptimes i determinarem la superfície necessària, en funció de la potència de cada turbina.

Les distàncies òptimes per el correcte rendiment de cada aerogenerador s'han extret amb els següents criteris:

- Distància mínima entre dos aerogeneradors al eix vertical té que ser unes 10- 15 vegades el diàmetre del rotor.
- Distància mínima entre dos aerogeneradors al eix horitzontal té que ser mínim 2 vegades el diàmetre del rotor per evitar pèrdues en turbulències provocades per altres aerogeneradors.

S'han triat 3 models de la marca Siemens- Gamesa amb les potències més utilitzades actualment per la producció d'energia elèctrica.



Figura 5.19 2MW Gamesa



Figura 5.20 5MW Gamesa



Figura 5.21 0.85MW Gamesa

Model aerogenerador	Nº aerogeneradors instal·lats	Superfície ocupada (m^2)
G58-850 kW	1308	66001680
G80-2.0 MW	556	53376000
G132-5.0 MW	223	58283280

Taula 5.1 Superfície necessària ocupada pels aerogeneradors. *(Elaboració pròpia)*

6. Comparativa amb Indicadors de sostenibilitat

6.1 Desenvolupament sostenible

Per completar aquest estudi utilitzarem una metodologia d'indicadors. Abans de tot, cal recordar que s'entén per sostenibilitat o desenvolupament sostenible. El terme desenvolupament sostenible apareix per primera vegada de manera oficial el 1987 a l'Informe **Brundtland** sobre el futur del planeta i la relació entre medi ambient i desenvolupament, i s'entén com a tal "aquell que satisfà les necessitats presents sense posar en perill la capacitat de les generacions futures per satisfer les seves pròpies necessitats".

Existeixen tres dimensions del desenvolupament sostenible: el social, l'ambiental i l'econòmic que han d'estar connectades entre si i satisfer-se de forma compatible. La sostenibilitat és un paradigma per pensar en un present i un futur on les consideracions socials, ambientals, econòmiques estiguin equilibrades i siguin compatibles entre si.

6.2 Metodologia

Per a l'elaboració d'aquest apartat, s'ha començat amb l'elecció d'un sistema d'indicadors. Hem escollit el recollit en el document **The Sustainability Metrics**. [20]

Primer s'han seleccionat els indicadors ambientals que més importància tenen pel que fa a emissions a l'aire i emissions a l'aigua, cada un d'ells multiplicat pel factor de potència adequat.

A continuació, s'han investigat dades sobre inversions i costos dels dos tipus d'energia que es vol analitzar i s'ha fet una mitjana aritmètica entre dos valors representatius del mateix indicador econòmic per obtenir els costos d'instal·lació i els costos d'operació i manteniment, com es veurà més endavant.

Els últims indicadors són els socials, els quals s'exposaran més endavant des d'una perspectiva més subjectiva per part de l'autor que, en un treball com aquest, és el qui millor pot definir el que es vulgui entendre per sostenibilitat social. Un cop obtingudes i agrupades totes les dades necessàries, es realitzarà l'anàlisi multi-criteri de decisió aplicat per a tots els escenaris considerats, per estimar, sosteniblement, quina de les dues energies resulta més adequada. Cada indicador tindrà en aquest estudi la mateixa rellevància a l'hora d'avaluar la comparativa final.

6.3 Definició d'Indicadors ambientals

Un indicador ambiental es pot definir, segons el Ministeri de Medi Ambient en la seva publicació Indicadors ambientals [10] com "una variable que ha estat socialment dotada d'un significat afegit major al derivat de la seva pròpia configuració científica, per tal de representar de forma sintètica una preocupació social respecte al medi ambient i afegir-la en el procés de presa de decisions".

Van néixer per la creixent preocupació en relació als aspectes mediambientals, i han de complir una sèrie de requisits:

- Ser científicament vàlid i verificable
- Ser representatiu del conjunt
- Ser sensible als canvis produïts en el medi o en les activitats humanes relacionades amb ell
- Estar basats en dades fiables i de qualitat
- Ser significatius i oferir informació rellevant
- Ser comprensibles i fàcils d'interpretar per qualsevol usuari
- Ser predictius, de manera que puguin alertar sobre una evolució negativa
- Ser comparables

S'han seleccionat els impactes mediambientals que més importància tenen en l'ús de cada tipus d'energia i s'ha construït una taula per al carbó i una altra per l'energia eòlica.

L'impacte ambiental dels sistemes energètics s'agrupa, llavors, en emissions a l'aire, emissions a l'aigua, residus i ús de sòl.

6.3.1 Emissions a l'aire

La contaminació atmosfèrica és un problema tant local com global provocat per l'emissió de determinades substàncies que, bé per si soles, o bé per resultats de reaccions químiques, provoquen efectes perjudicials per el medi ambient i la salut.

En relació amb la salut, l'ozó troposfèric i les partícules són els contaminants més preocupants ja que l'exposició als mateixos pot provocar conseqüències que van des de lleus efectes al sistema respiratori fins a la mortalitat prematura.

La contaminació atmosfèrica, el principal risc de salut mediambiental a Europa, redueix l'esperança de vida i contribueix a l'aparició de malalties cardíaques, respiratòries i càncer, a més de tenir un considerable impacte econòmic i deteriorar el medi ambient.

El transport rodat, l'agricultura, les plantes energètiques, la indústria i les llars són els majors emissors de contaminants a l'aire, per tant es tindrà que actuar amb una millora de les polítiques i també

invertir en investigació per trobar cada cop la millor manera de millorar la qualitat de l'aire de les nostres ciutats.

També hi ha que destacar que altres grans contaminants com el diòxid de nitrogen (**NO₂**) i l'ozó troposfèric (**O₃**) van causar al voltant de 78.000 i 14.400 morts prematures a 2014, respectivament.

La principal font d'emissió de diòxid de sofre a l'atmosfera és la combustió del carbó que conté sofre. El **SO₂** resultant de la combustió del sofre, que s'oxida i forma àcid sulfúric, H₂SO₄ un component de l'anomenada pluja àcida, juntament amb el òxids de Nitrogen (**NO_x**).

Aquests gasos en combinació amb l'oxigen de l'aire i el vapor d'aigua es converteixen en àcids que precipitaran a la superfície terrestre.

Des dels anys 1960, s'ha demostrat que els clorofluorocarburs (**CFC**) tenen efectes potencialment negatius: contribueixen de manera molt important a la destrucció de la capa d'ozó a l'estratosfera, així com a incrementar l'efecte hivernacle. El protocol de Mont-real va posar fi a la producció de la gran majoria d'aquests productes.

- Utilitzats en els sistemes de refrigeració i de climatització pel seu fort poder conductor, són alliberats a l'atmosfera en el moment de la destrucció dels aparells vells.
- Utilitzats com aerosol, una part s'allibera en cada utilització. Els aerosols utilitzen d'ara endavant altres gasos substitutius, com el CO₂.

Pel que fa al Monòxid de Carboni (**CO**) és un dels productes de la combustió incompleta. És perillós per a les persones i els animals, ja que es fixa a l'hemoglobina de la sang, implicant el transport d'oxigen en l'organisme. Es dilueix molt fàcilment en l'aire ambiental, però en un mitjà tancat, la seva concentració ho fa molt tòxic, fins i tot mortal. Cada any, apareixen diversos casos d'intoxicació mortal, a causa d'aparells de combustió posats en funcionament en una habitació mal ventilada.

En quant al Diòxid de Carboni (**CO₂**), la concentració d'aquest a l'atmosfera està augmentant de forma constant per l'ús de carburants fòssils com a font d'energia i és possible demostrar que aquest fet és el causant de produir un **increment de la temperatura mitjana de la Terra** (efecte hivernacle). L'amplitud amb que aquest efecte pot canviar el clima mundial depèn de les dades emprades en un model teòric utilitzat que són més o menys optimistes. La reducció de les emissions de CO₂ a l'atmosfera permetria que el cicle total del carboni aconseguís l'equilibri a través dels grans embornals de carboni com són l'oceà profund i els sediments.

En relació a la central **Compostilla II** s'han extret les següents dades respecte a la producció de diòxid de carboni:



Figura 6.3.1 Producció de diòxid de carboni per la central Compostilla II i energètica a nivell nacional. (Font:REE)

Com podem veure en el següent gràfic, aquesta central convencional produeix una gran quantitat de gas d'efecte hivernacle, exactament el **9%** de **CO2**, de la producció energètica a nivell nacional que es va produir l'any 2016.

Un cop recopilada la informació d'emissions tant per la central de carbó com per la d'energia eòlica utilitzarem els factors abans esmentats per realitzar la taula que compararà per igual les dues tecnologies estudiades.

6.3.2 Contaminants a l'aigua

Si parlem de contaminants a l'aigua hi ha que fer referència als següents:

- Acidesa de l'aigua
- Demanda química d'oxigen
- Eco-toxicitat de la vida marina
- Eutrofització

Acidificació de l'aigua, es refereix a l'alteració del pH de l'aigua fins a valors considerats àcids. Aigües el pH sigui menor a 5,5 es consideren àcides i contaminades.

DQO o Demanda Química d'Oxigen, determina la quantitat d'oxigen requerit per oxidar la matèria orgànica que hi ha dissolta en una mostra d'aigua residual, per mitjans químics. Com més gran és la DQO major contaminació posseeix la mostra.

Eco-toxicitat és un concepte que es refereix a l'estudi dels efectes tòxics produïts pels agents físics i químics sobre els éssers vius i el medi ambient, intentant explicar les causes i preveure els riscos possibles.

Eutrofització, és l'acumulació de nutrients o residus orgànics al litoral marí o en un riu, un llac, un embassament ... En haver excés de nutrients, plantes i altres organismes creixen en abundància i quan moren es podreixen esgotant l'oxigen i fent inviable la existència d'altres espècies que, prèviament, formaven l'ecosistema.

6.3.3 Residus

Residus sòlids generats com cendres de fons, cendres volants i escòries.

6.3.4 Usos del sol

Comprèn les activitats, accions i intervencions que es realitzen sobre un tipus de superfície per a produir, modificar-la o mantenir-la.

En aquest treball, es refereix al nombre de metres quadrats necessaris per cada MWh generat m^2/MWh .

En aquest cas es té un valor per al carbó de **2189** m^2/MWh i per a la eòlica de **139015** m^2/MWh .

		Carbó	Eòlica
Aire	Escalfament global	5054344.07	No aplica
	Salut	32.44	No aplica
	Acidificació atmosfèrica	9703.26	No aplica
	Ozó fotoquímic	549.74	No aplica

Taula 6.3.1 Contaminants atmosfèrics per cada font de generació *(Elaboració pròpia)*

		Carbó	Eòlica
Aigua	Acidesa de l'aigua	1.63	No aplica
	DQO	6.58	No aplica
	Eco-toxicitat	2.37	No aplica
	Eutrofització	815.1	No aplica
Superfície necessària (m²/MWh)		2189	139015
Residus (t)		4890357	No aplica

Taula 6.3.2 Contaminats aquàtics, usos del sol i residus alliberats per cada font de generació. *(Elaboració pròpia)*

6.4 Definició d'Indicadors econòmics

Són indicadors representatius de les variables econòmiques que afecten al projecte. En aquest treball, parlant d'indicadors econòmics en fonts d'energia, es tindran en compte els costos de capital i els costos d'operació i manteniment.

Els costos de capital, corresponen als costos de construcció de la instal·lació. Per una altra banda hem de considerar el cost d'operació i manteniment, que es basa en els costos fixes i variables que té la instal·lació per produir un MWh.

Cost de la instal·lació

Tant per al carbó com per a la eòlica s'ha calculat el cost de capital o inversió inicial com una mitjana aritmètica de dos valors, obtinguts de la taula de costos d'inversió i capital de l'Escola d'Organització Industrial. [5]

Els valors obtinguts per al carbó són **1.000 US\$ / kW** i **2150 US\$ /kW**, i els valors obtinguts per a la eòlica són **840 US\$ / kW** i **3000 US\$ / kW**.

Cost d'operació i manteniment

Igual que en l'apartat anterior, s'ha obtingut el resultat final com a mitjana aritmètica d'una sèrie de dades indirectes, ja que no és factible trobar un valor exacte d'aquests costos.

Per al carbó s'ha utilitzat, la pàgina referenciada anteriorment sobre els costos d'operació i manteniment en 2016, que ofereix com a valor més baix **5 US\$ / MWh** i el valor més elevat **17.93 US\$ / MWh**.

Per a l'eòlica s'ha utilitzat l'estudi de l'apartat anterior i s'ha obtingut com a valor més baix **2.08 US\$ / MWh**, mentre que el valor més gran és de **12 US\$ / MWh**.

Amb tot això, si es realitza la mitjana aritmètica de costos i es transformen les quantitats a euros, s'obté la següent taula:

	Operació i manteniment US\$/MW	€/MW	Instal·lació US\$/kW	€/kW
Carbó	11.46	9.58	1575	1316.8
Eòlica	7.04	5.88	1920	1605.28

Taula 6.4.1 Mitjana del costos d'instal·lació i d'operació i manteniment per cada tipologia de central. (Font: EOI)

6.5 Definició d'Indicadors socials

Els indicadors socials es classifiquen en varis apartats:

6.5.1 Seguretat del subministra

Si en referim al subministra de **carbó**, segons estudis del Consell Mundial de l'Energia, actualment s'estima que les reserves de carbó en el món són properes al bilió de tones, que es reparteix gairebé al 50% entre reserves d'hulla i antracita i reserves de lignits.

Els majors dipòsits de carbó estan a Amèrica del Nord, Rússia i Xina. A Espanya es tenen reserves però la majoria del seu carbó és d'importació.

Tot i que es porti molts anys explotant aquest combustible, si es manté l'actual ritme de consum es calculen reserves de carbó per a més de 200 anys.

Per tant, es pot dir que les centrals de carbó garanteixen un adequat/ estable funcionament del sistema elèctric a curt i mig termini.

Les previsions oficials defensen que a les reserves mundials de carbó els hi queden uns dos-cents anys però diversos estudis qüestionen aquesta dada i asseguren que la producció mundial d'aquest combustible fòssil entrarà en un declivi irreversible dins de tot just vint anys.

Pel que fa al **recurs eòlic**, al ser un recurs renovable, podem dir que la possibilitat de generar energia elèctrica a partir del vent és inesgotable.

A més el vent entenent-lo com a recurs de generació té una gran diversitat geogràfica, per tant s'ha d'importar i es pot obtenir al mateix punt de generació. Cal destacar que encara que té una gran diversitat geogràfica, depèn en gran mesura de la climatologia del lloc de generació. Això comporta que l'energia elèctrica necessiti unes condicions específiques de vent.

6.5.2 Problemes Intergeneracionals

El carbó és la font més gran d'emissió de CO₂ a l'atmosfera, i el principal responsable del canvi climàtic. Aquest serà l'aspecte que més afectarà a les generacions futures.

El 2014 les emissions de CO₂ totals d'Espanya van arribar als 225 milions de tones, de les quals **60,5** corresponen a les emissions de CO₂ del sector elèctric peninsular, i d'aquestes, al voltant de **41** milions de tones van correspondre només a la producció de energia amb carbó.

En quant al recurs eòlic, al no tenir manca de disponibilitat energètica i una emissió d'emissions nul·la. Entenem que pel que fa l'afectació del canvi climàtic a les generacions futures també serà nul.

6.5.3 Llocs de treball

Els responsables de polítiques europeus reconeixen que les fonts d'energia renovables tenen un gran potencial de creació d'ocupació, a més de produir beneficis ambientals. El sector de les energies renovables és el que presenta un major creixement a Europa. El sector de l'energia eòlica va arribar a generar 263.000 llocs de treball sostenibles a Europa i contribuir l'any 2016 amb 36.000 milions d'euros al PIB Europeu. De totes les energies renovables, la eòlica juntament amb la solar és de les que més potencial de creació d'ocupació té. Segons els experts, la instal·lació i manteniment de la eòlica per obtenir energia renovable genera 30 vegades més llocs de treball que el sector del carbó i més de forma competitiva, pel menor cost de la eòlica sobre els combustibles fòssils.

Cal destacar que si hi ha un país amb la situació radicalment oposada respecte a la tendència dominant és Espanya. S'ha reduït pràcticament a la meitat dels llocs de treball entre 2008 y el 2014

6.5.4 Acceptació social

Les centrals tèrmiques de carbó són, juntament amb la nuclear, unes de les fonts d'energia pitjor vistes socialment.

Com s'ha vist, la combustió del carbó és el procés que més contribueix a l'efecte hivernacle i, per tant, l'escalfament global. A més, s'ha demostrat que té importants impactes en la salut de les persones, sobretot si aquestes persones viuen a prop de les centrals.

La destrucció de la capa d'ozó, els múltiples articles contra les energies fòssils, els residus que produeixen i el seu esgotament, aconseguir finalment que la major part de la societat tingui un gran rebuig cap a aquestes formes de generació elèctrica.

Les renovables són les energies més acceptades en la societat actual, principalment a causa que, en general, no contribueixen al canvi climàtic.

A més, s'ha demostrat, que les renovables generen més ocupació que la generació elèctrica per combustibles fòssils i, sobretot, aporten gran quantitat d'avantatges per al desenvolupament del medi rural.

Moltes organitzacions ecologistes donen suport mobilitzacions per promoure l'abandonament de l'extracció i ús de combustibles fòssils i, a més, establir un model energètic 100% renovable, pas imprescindible per complir l'acord de París. També moltes polítiques donen suport el seu ús, per exemple, amb subvencions autonòmiques dirigides a particulars i petites empreses per promocionar l'estalvi energètic i l'autoconsum.

Mitjançant aquests criteris i utilitzant una escala senzilla que va des de “Alt” a “Baix”, s'avaluarà l'impacte de cada tecnologia en cada aspecte, arribant a la següent taula resum:

		Carbó	Eòlica
Acceptació social		Baixa	Alta
Seguretat del subministra	Reserves	Mitja	Alta
	Independència d'importació	Mitja	Alta
	Garantia de subministra	Alta	Alta
Llocs de Treball		Mitja	Alta
Problemes Intergeneracionals	Residus	Mitja	Baixa
	Impacte canvi climàtic	Alta	Baixa

Taula 6.5.1 Resum d'indicadors socials. *(Elaboració pròpia)*

Anàlisi de l'impacte ambiental

L'impacte ambiental d'aquest projecte vindrà determinat pel consum energètic, de paper i de tinta necessaris per la seva impressió.

En cas de ser necessària una còpia física del mateix, es recomana la seva impressió en doble cara, per tal de minimitzar el consum de paper.



Conclusions

De les anàlisis individuals i comparatives en la forma de producció d'energia elèctrica en dues centrals amb característiques diametralment oposades que s'han realitzat en aquest treball, s'extreuen dues conclusions principals de les quals es deriven un seguit d'efectes secundaris.

La primera de les conclusions és la verificació tant teòrica com pràctica de la possibilitat de la substitució d'una central elèctrica de caire tradicional que fa servir el carbó com a matèria primera per una d'energia eòlica. Inicialment, podríem dir que potències en mà això és viable tecnològicament tot i què en funció dels paràmetres analitzats per trobar la superfície necessària de la central eòlica substitutòria, es deriva un punt crític en la substitució de les centrals. Malgrat que inicialment podem pensar que la solució podria ser viable, els resultats d'aquest treball condueixen clarament a la conclusió que, com a mínim actualment, es tindria que disposar d'una quantitat de terreny tan gran que ens fa poder afirmar que la substitució tot i ser possible no té vessant pràctica. No tant pel control dels aerogeneradors sinó per la superfície que ocuparien.

La segona conclusió que suposaria la implantació d'una central eòlica en lloc d'una de carbó és l'important l'efecte mediambiental, econòmic i social que es produiria.

Si comparem els indicadors ambientals podem veure que pel que fa l'energia eòlica és 100% lliure d'emissions contaminants, en canvi la crema de carbó produeix grans quantitats de gasos d'afecte hivernacle entre altres gasos tòxics per l'esser humà.

Durant l'execució d'aquest treball s'ha pogut constatar un fet ja conegut, que l'energia eòlica és molt més sostenible que l'energia produïda a base de carbó. L'objectiu de l'acord de París no serà possible sinó s'aborda la necessitat d'aturar radicalment els efectes adversos del canvi climàtic i per tant les energies renovables hauran de tenir un paper fonamental perquè l'increment de la temperatura mitjana global no superi els 2 °C.

En quant al indicador econòmic, podem observar com amb l'energia eòlica el cost d'operació i manteniment és un **62%** més barat que amb tecnologia convencional no renovable i bruta; en canvi si comparem el cost d'instal·lació resulta que l'energia eòlica és un **18%** més cara.

Pel que fa els indicadors socials podem veure clarament que l'energia renovable i neta està molt més valorada socialment parlant que l'energia produïda amb fonts fòssils convencionals. A més a més, la genera d'ocupació és més elevada en el sector energètic eòlic.

Finalitzarem argumentant que la hipòtesis motivadora d'aquest treball *“Tecnològicament parlant, la transició total dels mix energètics que funcionen amb combustibles fòssils per energies renovables serà possible en un parell de dècades”* tot i els grans avantatges mediambientals i econòmics que implica actualment no és apta per substituir tota la producció d'una central tèrmica.



Anàlisi Econòmica

El pressupost d'aquest treball final de grau vindrà desglossat en dos parts. En primer lloc es calcularà el cost d'inversió de temps com a enginyer en la realització de tot el projecte. En segon lloc es calcularan els costos de material necessaris per fer la realització d'aquest.

A. Etapes del projecte

Dins les etapes que ha tingut aquest projecte es diferenciaren clarament tres d'elles. Degut a que és un treball bibliogràfic on la recerca d'informació és el punt més important, es troben les etapes de:

- Recerca d'informació
- Anàlisi de la informació
- Elaboració de la memòria

Etapa	Hores	€/h	Cost de l'etapa €
Recerca d'informació	80	15	1200
Anàlisi de la informació	170	20	3400
Elaboració de la memòria	150	25	3750
SUBTOTAL	400	-	8350

Taula A. Cost segons les etapes del projecte. *(Elaboració pròpia)*

B. Desenvolupament del projecte

Pel desenvolupament d'aquest projecte només ha estat necessari un ordinador portàtil, connexió a internet i programa Microsoft Office 2010.

Recurs material	Temps	Preu/mes €	Cost €
Microsoft office 2010	4 mesos	9	36
Manteniment de l'ordinador	4 mesos	30	120
Connexió a internet	4 mesos	40	160
SUBTOTAL	-	-	316

Taula B. Cost segons els recursos materials. *(Elaboració pròpia)*

C. Cost total del projecte

El cost total del projecte serà de desglossat de la següent forma:

Tipus de despesa	Cost €
Etapas del projecte	8350
Recursos materials	316
SUBTOTAL	8666
IVA 21%	1819.86
TOTAL	10485.86

Taula C. Cost total del projecte. *(Elaboració pròpia)*



Bibliografia

[1] Análisis de viabilidad de un parque eólico offshore. - PDF. (n.d). Disponible des de <http://docplayer.es/13392418-Analisis-de-viabilidad-de-un-parque-eolico-offshore.html>

[2]ENERGIAEOLICA

<http://llogit0.uab.es/mtig/intranet/Projectes/analisi/windweb/es/tour/design/quietma.htm>

[3] PRTR-España. (n.d). Información pública - Informe detallado UPT COMPOSTILLA | PRTR España.Disponible desde http://www.prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=3189

[4] Balance de energía eléctrica de Cataluña. Instituto Catalán de Energía. (n.d). Institut Català d'Energia.Disponibledesdehttp://icaen.gencat.cat/es/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc_energia/

[5] Coste y Precio de las Diferentes Fuentes de Energía. (n.d). Disponible des de <http://www.eoi.es/blogs/danielbarbosa/2013/11/19/coste-y-precio-de-las-diferentes-fuentes-de-energia/>

[6] Distribución de los aerogeneradores en un parque eólico. (n.d). Disponible des de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia41/HTML/Articulo03.htm>

[7] El bajo precio del carbón catapultó el uso en las térmicas en España. (n.d). La Vanguardia. Disponible desde <http://www.lavanguardia.com/natural/20160111/301318198522/precio-carbon-termicas-espana.html>

[8] El Carbón en España en 2016

http://www.observatoriocriticodelaenergia.org/files_download/El_carbon_en_Espana_en_2016.pdf

[9] Era del Pico (Spain) - Wind farms - Online access - The Wind Power. (n.d). Disponible des de https://www.thewindpower.net/windfarm_en_2137_era-del-pico.php

[10] Colmenar E.- Indicadores Ambientales: el mejor diagnóstico. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

[11] **El cierre de la térmica de Compostilla, la traición de Endesa a sus orígenes** - ileon.com. Disponible desde <http://www.ileon.com/actualidad/empresas/066218/el-cierre-de-la-termica-de-compostilla-la-traicion-de-endsa-a-sus-origenes>

[12] **Información general de la Central Térmica de Compostilla** | ENDESA EDUCA. (n.d). Endesa Educa. Disponible desde http://www.endsaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/instalaciones-electricas/informacion-compostilla

[13] **Inicio** | OMIE. (n.d). Disponible desde <http://www.omie.es/inicio>

[14] **La central de Compostilla fue en 2016 la más contaminante de Castilla y León con un 31,62% de emisiones** | El Bierzo Noticias - Leonoticias. (n.d). El Bierzo Noticias - Leonoticias. Disponible desde <http://www.elbierzonoticias.com/bierzo/central-compostilla-2016-20171102175540-nt.html>

[15] **Las 10 mayores centrales térmicas de carbón de España** – El Periódico de la Energía | El Periódico de la Energía con información diaria sobre energía eléctrica, eólica, renovable, petróleo y gas, mercados y legislación energética. (n.d). Disponible desde <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-termicas-de-carbon-de-espana/>

[16] **Mapas - Observatorio de la Sostenibilidad**. (n.d). Observatorio de la Sostenibilidad. Disponible desde <http://www.observatoriosostenibilidad.com/2016/11/23/mapas/>

[17] **RED ELECTRICA DE ESPAÑA** - Seguimiento de la demanda de energía eléctrica. (n.d). Demanda de energía eléctrica en tiempo real, estructura de generación y emisiones de CO2. Disponible desde <https://demanda.ree.es/demanda.html>

[18] **Seguimiento de la demanda de energía eléctrica**. (n.d). Estructura de generación (MW). Disponible desde <https://demanda.ree.es/movil/peninsula/demanda/acumulada>

[19] **UNESA - Actividades**. (n.d). Disponible desde <http://www.unesa.es/temas-de-interes/actividades>

[20] **The Sustainability Metrics. Institution of Chemical Engineers** (IChemE), 2002.

[21] **ENERGIAS RENOVABLES**. Eólica Disponible desde <https://www.energias-renovables.com/eolica/la-industria-eolica-emplea-a-263-000-20171130>

[22] **IDAE**
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e5_empleo_A_08df7cbc.pdf



Annex 1

A1. Càlcul del número d'aerogeneradors

Dades:

	Potència instal·lada (MW)	Nº hores treballant	Energia produïda 2016 (MWh)
Central Compostilla II	1200	8784	3372657

Taula A1.1. Dades de la central Compostilla II. (Font: ENDESA)

	Potència instal·lada (MW)	Nº hores treballant	Energia produïda (MWh)
Central Era del Pico	11.9	-	4.11
Grup 1	8.5	-	2.31
Grup 2	3.4	-	1.8

Taula A1.2 Dades de la central Era del Pico. (Font: WindFarms)

En primer lloc passarem l'energia produïda de la central **Compostilla II** durant el 2016 a energia produïda durant una hora, per tal d'equiparar els temps de producció energètica.

	Nº hores treballant	Energia produïda 2016 (MWh)	Energia produïda 1 hora (MWh)
Central Compostilla II	8784	8784	383.96

Taula A1.3 Conversió de la producció energètica anual a producció d'una hora (Font: WindFarms)

A continuació es calcularà a partir d'un factor de conversió amb les dades de potència i energia que ens proporciona **Era del Pico**, la quantitat de potència necessària per la producció energètica que hem calculat anteriorment.

Potència en MW necessària per produir 383,96 MWh	1116,93 MW
---	-------------------

Taula A1.4. Potència eòlica a instal·lar en funció de l'energia produïda per Compostilla II. (Elaboració pròpia)

A partir d'aquest resultat, el calcularà la quantitat necessària d'aerogeneradors a instal·lar al futur parc eòlic a partir de la potència nominal de cada un.

Potència nom. de l'aerogenerador (MW)	Número d'aerogeneradors
0.85	1308
2	556
5	223

Taula A1.4 Número d'aerogeneradors a instal·lar en funció de la potència total necessària. (Elaboració pròpia)

A2. Càlcul dels indicadors ambientals

Substancia	Factor de potència	Emissions	
		Tones W	Valor EB=ΣW·pf
Acidesa Atmosfèrica			
SO2	1	9650	9650
HCl	0.88	56.8	49.98
HF	1.6	2.052	3.28
Escalfament global			
CO2	1	3110000	3110000
N2O	310	6270	1943700
CH4	21	30.67	644.07
Salud			
As	160	0,0536	8.57
Cd	640	0,0104	6.656
Hg	16.67	0,14	2.34
Ni	160	0,093	14.88
Ozó fotoquímic			
CH4	0.034	30.67	1.04
SO2	0.048	9650	463.2
CO	0.027	3165.94	85.5

Substancia	Factor de potència	Emissions	
		Tones W	Valor EB=ΣW·pf
Ozó fotoquímic			
SO2	0.048	9650	463.2
CO	0.027	3165.94	85.48
CH4	0.034	30.67	1.04
Acidesa de l'aigua			
HCl	0.027	56.8	1.53
HF	0.05	2.052	0.10
DQO			
CFC	0.54	12.20	6.58
Ecotoxicitat			
Cd	2	0,0104	0.020
Hg	16.67	0,14	2.33
Ni	0.17	0,093	0.015
Eutrofització			
NOx	0.13	6270	815.1

Taula A2.1 Resum del càlcul de contaminants atmosfèrics i aquàtics amb font de carbó. (Elaboració pròpia)

